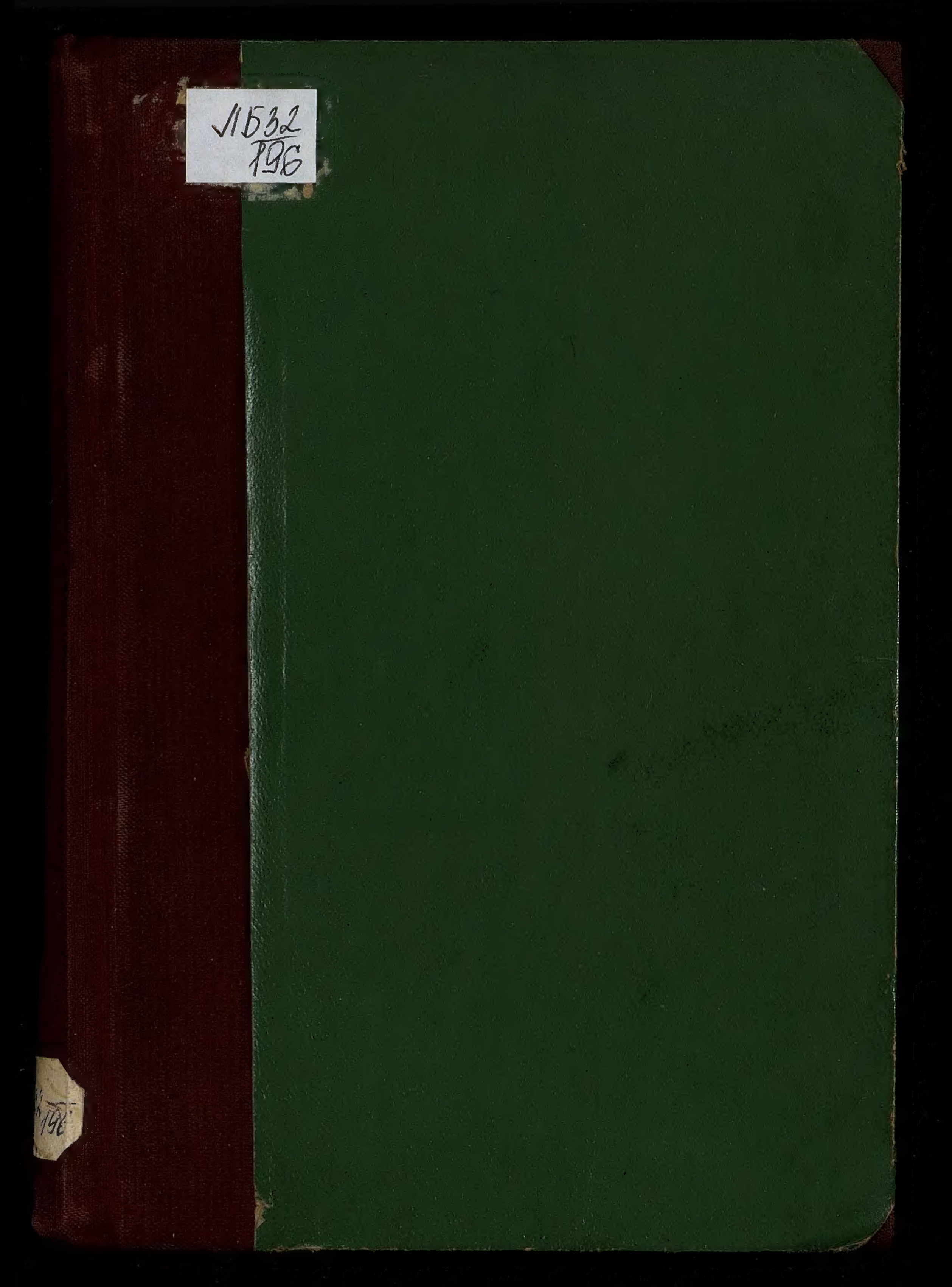

Л532
Р96

Г. Д. СМИТ

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ
ДЛЯ ВОЕННЫХ ЦЕЛЕЙ

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОТЧЕТ
О РАЗРАБОТКЕ АТОМНОЙ БОМБЫ
ПОД НАБЛЮДЕНИЕМ
ПРАВИТЕЛЬСТВА США

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО

под редакцией *Г. Н. ИВАНОВА*

*ГОСУДАРСТВЕННОЕ ТРАНСПОРТНОЕ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
Москва 1946*



Техн. редактор *Ю. В. Найдышев*

Сдано в набор 10/XI 1945 г. Подписано в печать 30/I 1946 г. Форм. бумаги 60×92 1/16 д. л. Объём 17 1/4 п. л. + 4 вкл. Уч.-изд. 20 л. ЖДИЗ 75503. Зак. тип. 1339. А00726.
Тираж 30000 экз.

1-я тип. Трансжелдориздата НКПС

ПРЕДИСЛОВИЕ

Рассказ о том, как объединенными усилиями многих организаций была создана в Америке атомная бомба, представляет собой увлекательный, но сугубо научный отчет. Разумеется, в данное время этот отчет не может быть написан со всеми подробностями по соображениям военной безопасности. Однако, нет причин, по которым историю административно-организационных мероприятий по изготовлению атомной бомбы и основные научные представления, послужившие фундаментом для различных практических выводов, нельзя было бы сделать достоянием широкой публики. Для этого и издается отчет профессора Г. Д. Смита.

В этой книге содержатся все научные данные, опубликование которых не может нарушить интересы национальной безопасности. К частным лицам или организациям, участвовавшим прямо или косвенно в осуществлении проекта, обращаться с просьбами о сообщении дополнительных сведений не следует. Лица, разглашающие или собирающие любым способом дополнительные данные, подлежат суровым наказаниям, предусмотренным законом о шпионаже.

Работа увенчалась успехом благодаря усилиям многих тысяч ученых, инженеров, рабочих и руководящего персонала, чей упорный труд, молчаливая настойчивость и товарищеское сотрудничество сделали возможными описанные ниже беспримерные технические достижения.

Военное Министерство
Вашингтон
Август 1945 г.

Л. Р. Гроувз
Генерал-майор США

ОТ АВТОРА

Ответственность за нашу национальную политику лежит, в конечном счете, на наших гражданах, которые только тогда могут сознательно выполнить свой долг, когда они достаточно информированы. От среднего гражданина невозможно ожидать ясного понимания устройства атомной бомбы или ее действия; но в нашей стране имеется значительное количество инженеров и ученых, которые могут понять такие вещи и которые могут объяснить своим согражданам возможности, скрытые в атомных бомбах. Настоящая работа предназначается для этой группы специалистов; она представляет собой основанный на фактах, общий отчет о работах по созданию атомных бомб, которые проводились в Соединенных Штатах с 1939 года. Этот доклад не является ни официальным документальным отчетом, ни научным трудом для специалистов.

Требования сохранения военной тайны отразились как на отдельных местах, так и на общих установках книги, так что множество интересных данных было опущено.

Ссылки на работы в Англии и Канаде не претендуют на полноту, так как все написанное в книге относится к деятельности, протекавшей в Соединенных Штатах Америки.

Автор надеется, что благодаря сотрудничеству всех групп, участвовавших в осуществлении проекта, настоящий отчет достаточно точен; за все ошибки, которые могли быть допущены, он принимает на себя полную ответственность.

Г. Д. Смит

1 июля 1945 г.

* * *

Во втором издании внесены лишь небольшие изменения. От отчета, опубликованного 12 августа 1945 г., оно отличается следующим: 1) небольшими пояснениями и исправлениями опечаток,

2) включением параграфа о радиоактивных эффектах, разрешенного Военным Министерством в качестве дополнения к первому изданию отчета, 3) добавлением нескольких замечаний о достижениях по предотвращению вредного влияния предприятий по производству атомных бомб на здоровье окружающего населения, 4) добавлением нескольких имен, 5) добавлением Приложения 6, представляющего собой разрешенный Военным Министерством отчет об испытании атомной бомбы в Нью-Мексико 16 июля 1945 г., 6) добавлением фотоснимков и 7) добавлением указателей.

Г. Д. С.

1 сентября 1945 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ
ДЛЯ ВОЕННЫХ ЦЕЛЕЙ

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

1.1. Цель настоящего отчета — дать описание научных и технических достижений в США с 1940 г., способствовавших военному применению атомной энергии. Предмет изложен здесь не в популярной форме, и книга рассчитана на научных работников и инженеров, а также на других лиц с высшим образованием, имеющих хорошую подготовку по физике и химии. Эквивалентность массы и энергии выбрана в качестве руководящего принципа при изложении основных данных Введения.

СОХРАНЕНИЕ МАССЫ И ЭНЕРГИИ

1.2. Существуют два принципа, ставшие краеугольными камнями здания современной науки. Первый принцип — материя не создается и не уничтожается и лишь переходит из одного вида в другой — был высказан в XVIII веке и знаком каждому изучающему химию; он известен под названием закона сохранения массы. Второй принцип — энергия не создается и не уничтожается и лишь переходит из одного вида в другой — появился в XIX веке и с тех пор всегда был бичом изобретателей вечного двигателя; он известен под названием закона сохранения энергии.

1.3. Эти два принципа постоянно направляли и дисциплинировали развитие науки и ее технических применений. Для нужд практики они считались неизменными и независимыми друг от друга принципами еще пять лет тому назад. Для большинства практических приложений они и до сего времени остаются такими, но, в действительности, эти два принципа являются двумя аспектами единого принципа, так как мы убедились, что вещество может иногда превращаться в энергию, и энергия — в вещество. В частности, такое превращение наблюдается в процессе деления

ядер урана, во время которого атомное ядро расщепляется на осколки с освобождением огромного количества энергии. Военное применение этой энергии стало целью научных и научно-технических исследований; проекты производства ее описаны в настоящем отчете.

ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ МАССЫ И ЭНЕРГИИ

1.4. Один из выводов, полученных на довольно ранней стадии развития теории относительности, состоял в том, что инертная масса движущегося тела увеличивается с возрастанием его скорости. Это означало эквивалентность изменения энергии движения тела, т. е. его кинетической энергии, и изменения его массы. Для большинства физиков-практиков и инженеров это утверждение казалось математической фикцией, лишенной практического значения. Даже Эйнштейн едва ли мог предвидеть современные приложения этого принципа, но еще в 1905 году он ясно утверждал, что масса и энергия эквивалентны, и предположил, что доказать эту эквивалентность можно было бы путем изучения радиоактивных веществ. Количество энергии, E, эквивалентное массе, m, по Эйнштейну, определяется уравнением

$$E = mc^2,$$

где c есть скорость света. Это уравнение приводит к удивительным результатам. Оно показывает, что один килограмм вещества, полностью превращенного в энергию, дал бы 25 миллиардов киловатт-часов энергии. Это равно энергии, которую выработала бы вся электро-энергетическая промышленность Соединенных Штатов (при уровне производства 1939 г.) при работе в течение приблизительно двух месяцев. Сравните эту фантастическую цифру с 8,5 киловатт-часами тепловой энергии, получаемой при сжигании такого же количества угля.

1.5. Огромное число, выражающее это превращение, интересно в нескольких отношениях. Во-первых, оно объясняет, почему эквивалентность массы и энергии никогда не наблюдалась при обычном химическом сжигании. Теперь мы знаем, что при таком сжигании выделяющееся тепло соответствует некоторой массе, но эта масса так мала, что не может быть обнаружена самыми чув-

ствительными весами, какие только существуют. (Она — порядка нескольких миллиардных долей грамма на одну грамм-молекулу). Во-вторых, стало ясно, что во всех знакомых нам земных процессах никакие заметные количества вещества не превращались в энергию, так как такие большие источники энергии на земле не были известны. В-третьих, возможность вызвать превращение вещества в энергию или как-либо управлять этим превращением стала казаться весьма отдаленной. Наконец, величина самого коэффициента превращения давала благодатную почву для размышлений философам, физикам, инженерам и эстрадным комикам. В течение двадцати пяти лет эти размышления не находили экспериментальных подтверждений, но, начиная с 1930 года, такие подтверждения стали появляться в быстро растущих количествах. Прежде, чем обсуждать эти экспериментальные доказательства и практические методы частичного превращения вещества в энергию (что является нашей главной темой), мы сделаем обзор основных положений атомной и ядерчой физики. При этом мы предполагаем у читателя общее знакомство с атомной природой вещества и с существованием электронов *).

РАДИОАКТИВНОСТЬ И СТРОЕНИЕ АТОМА

1.6. Явления радиоактивности, открытые А. Беккерелем в 1896 г. и вслед затем изучавшиеся Пьером и Марией Кюри, Э. Резерфордом и многими другими, сыграли ведущую роль в открытии общих законов строения атома и в подтверждении эквивалентности массы и энергии.

ИОНИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

1.7. Первым из наблюдавшихся явлений радиоактивности было явление почернения фотографической пластинки под действием минералов, содержащих уран. Хотя до некоторой степени еще и сейчас пользуются этим свойством при исследовании радиоактив-

*) Дальнейшие сведения можно почерпнуть из следующих книг: Э. В. Шпольский, Атомная физика, 1944; О. Блэквуд, Э. Хэтчинсон и др., Очерки по физике атома, 2-е изд., 1941; Р. А. Милликэн, Электроны (+ и —), протоны, фотоны, нейтроны и космические лучи, 1939; Л. Мысовский, Новые идеи в физике атомного ядра, 2-е изд. 1939; Ф. Разетти, Основы ядерной физики, 1940. (*Прим. ред.*).

ности, наибольшее научное значение имеет способность радиоактивных веществ ионизовать газы. Воздух и другие газы в нормальных условиях не проводят электричества — иначе невозможно было бы эксплоатировать линии электропередачи и электрические машины на открытом воздухе. Однако, при некоторых условиях молекулы воздуха распадаются на положительно и отрицательно заряженные частицы, называемые ионами. Ионизованный таким образом воздух становится проводником электричества. Через несколько месяцев после первого открытия радиоактивности Беккерель обнаружил способность урана ионизовать воздух. В частности, он нашел, что заряд электроскопа очень быстро исчезает, вследствие ионизации воздуха, если вблизи электроскопа поместить какую-нибудь из солей урана. (То же самое произойдет с зарядом аккумулятора, если близко к нему поднести достаточное количество радиоактивного вещества). С того времени скорость разрядки электроскопа всегда служит мерой интенсивности радиоактивности. Более того, почти все современные приборы для изучения явлений радиоактивности прямо или косвенно основаны на ионизационном эффекте. Элементарное описание подобных приборов — электроскопов, счетчиков Гейгера-Мюллера, ионизационных камер и камер Вильсона — приведено в Приложении 1.

РАЗЛИЧНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЧАСТИЦЫ

1.8. На различия в природе «излучений» указывает тот факт, что ионизующая способность разных радиоактивных веществ различна как по своему характеру, так и по интенсивности. Некоторые излучения обладают значительно большей проникающей способностью, чем другие; следовательно, два радиоактивные образца, оказывающие одинаковое действие на неэкранированный электроскоп, могут совершенно по разному действовать на электроскоп, если он экранирован, т. е. если между электроскопом и образцом помещены экраны.

1.9. Изучение поглощения и других явлений показало, что радиоактивные вещества испускают три типа «излучений»: α-частицы, являющиеся очень быстрыми ионизованными атомами гелия (ядрами атомов гелия), β-частицы, являющиеся очень быстро движущимися электронами, и γ-лучи, представляющие собою электромагнитное излучение, подобное рентгеновским лучам. Из всех

этих излучений лишь γ-лучи правильно называть излучением, но даже они по своему действию весьма напоминают частицы, благодаря своей малой длине волны. Такая «частица», или квант γ-излучения, называется фотоном, γ-лучи обладают весьма большой проникающей способностью, α- и β-лучи — меньшей. Но даже несмотря на то, что α- и β-лучи обладают не очень большой проникающей способностью, кинетическая энергия их для частиц атомных размеров огромна — она в тысячи раз превосходит кинетическую энергию газовых молекул, которую они имеют благодаря тепловому движению, и в тысячи раз больше, чем изменения энергии на один атом в химических реакциях. Именно по этой причине Эйнштейн предположил, что изучение радиоактивности сможет доказать эквивалентность массы и энергии.

АТОМ

1.10. Прежде чем рассматривать вопрос о том, какие атомы испускают α-, β- и γ-лучи, и обсуждать законы, управляющие этим испусканием, мы изложим общепринятые представления о строении атомов, частично основанные на изучении радиоактивности.

1.11. Согласно нашим современным взглядам, каждый атом состоит из небольшого тяжелого ядра с диаметром, примерно в 10^{-12} *см*, окруженного большой пустой областью с диаметром 10^{-8} *см*, в которой, в некоторой степени подобно планетам вокруг солнца, движутся электроны. Ядро несет целое число положительных зарядов, каждый из которых равен $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кулонов. (Единицы см. в Приложении 2). Каждый электрон несет один отрицательный заряд такой же величины, а число электронов, обращающихся вокруг ядра, равно числу положительных зарядов ядра, так что заряд атома в целом равен нулю.

1.12. *Атомный номер и электронная структура.* Число положительных зарядов ядра называется атомным номером Z. Он определяет число электронов во внеядерной структуре атома, которое, в свою очередь, определяет его химические свойства. Таким образом все атомы данного химического элемента имеют один и тот же атомный номер, и обратно, все атомы, имеющие одинаковые атомные номера, являются атомами одного и того же элемента, независимо от возможных различий в строении их ядер. Внеядерные электроны атома располагаются последовательными

оболочками, согласно твердо установленным законам. Оптические спектры возникают вследствие возмущений в наружных частях этой электронной структуры; рентгеновские лучи возникают в результате возмущений электронов оболочек, близких к ядру. Химические свойства атома зависят от наиболее удаленных от ядра электронов, и образование химических соединений сопровождается незначительными перегруппировками этих электронных структур. Отсюда следует, что когда при окислении, горении, взрыве или каком-либо другом химическом процессе выделяется энергия, она выделяется за счет этих структур, так что группировка электронов в атомах, образовавшихся в результате реакции, должна иметь меньшую энергию. (Предполагают, что общая масса этих продуктов соответственно меньше, но обнаружить это пока невозможно). Атомные ядра не испытывают изменений при обычных химических реакциях.

1.13. *Массовое число*. Не только положительный заряд ядра всегда выражается целым числом, равным числу электронных зарядов, но и масса ядра всегда *приближенно* равна целому кратному основной единицы массы, почти равной массе протона — ядра атома водорода (см. Приложение 2). Это целое число называют массовым числом A; оно всегда по меньшей мере вдвое больше атомного номера; исключение составляет водород и редкий изотоп гелия. Так как масса протона примерно в 1800 раз больше массы электрона, то масса ядра почти равна массе всего атома.

1.14. *Изотопы и изобары*. Атомы, имеющие один и тот же атомный номер, но разные массовые числа, называются изотопами. Химически они тождественны, будучи лишь разновидностями одного и того же химического элемента. Атомы, имеющие одинаковые массовые числа, но разные атомные номера, называются изобарами и представляют собою различные химические элементы.

РАДИОАКТИВНОСТЬ И ЯДЕРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

1.15. Если атом испускает α-частицу (которая имеет атомный номер два и массовое число четыре), то он становится атомом уже другого элемента, атомный номер которого меньше на две, а массовое число — на четыре единицы. При испускании ядром β-частицы атомный номер на единицу возрастает, а массовое число остается неизменным. В некоторых случаях эти изменения со-

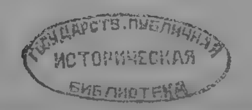
провождаются испусканием γ-лучей. Элементы, которые самопроизвольно изменяются или «распадаются» указанным образом, неустойчивы и их принято называть «радиоактивными». Это свойство испускать α- или β-частицы обнаруживают только те естественные элементы (за редкими исключениями), которые имеют очень большие атомные номера и массовые числа, например, уран, торий, радий и актиний, т. е. элементы с самым сложным строением ядер.

ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА; РАДИОАКТИВНЫЕ ЯДРА

1.16. Все атомы данного радиоактивного изотопа обладают одинаковой вероятностью распада в заданный промежуток времени, так что достаточно большой образец радиоактивного вещества, содержащий многие миллионы атомов, всегда превращается или «распадается» с одной и той же скоростью. Эта скорость, с которой вещество меняется или «распадается», выражается через «период полураспада» — время, необходимое для распада половины всего первоначального количества атомов; это время, очевидно, постоянно для каждой данной разновидности атомов. Периоды полураспада (или просто периоды) радиоактивных веществ лежат в интервале от долей секунды для самых неустойчивых из них до миллиардов лет — для тех веществ, которые лишь слегка неустойчивы. Часто «дочернее» ядро, подобно своему радиоактивному «родителю», само является радиоактивным и распадается и т. д., пока через несколько последующих поколений ядер не образуется устойчивое ядро. Существуют три такие семейства или ряда, включающие в общей сложности около сорока разных радиоактивных веществ (рис. 1). Ряд радия начинается с одного изотопа урана, ряд актиния — с другого изотопа урана и ряд тория начинается с тория. Конечными продуктами каждого ряда, образующимися после десяти или двенадцати последовательных испусканий α- и β-частиц, являются устойчивые изотопы свинца.

ПЕРВЫЕ ОПЫТЫ ИСКУССТВЕННОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ ЯДРА

1.17. До 1919 года никому не удавалось нарушить устойчивость обычных ядер или повлиять на скорости распада радиоактивных ядер. В 1919 г. Резерфорд показал, что α-частицы, обладающие большой энергией, способны вызвать изменения в ядре обычного



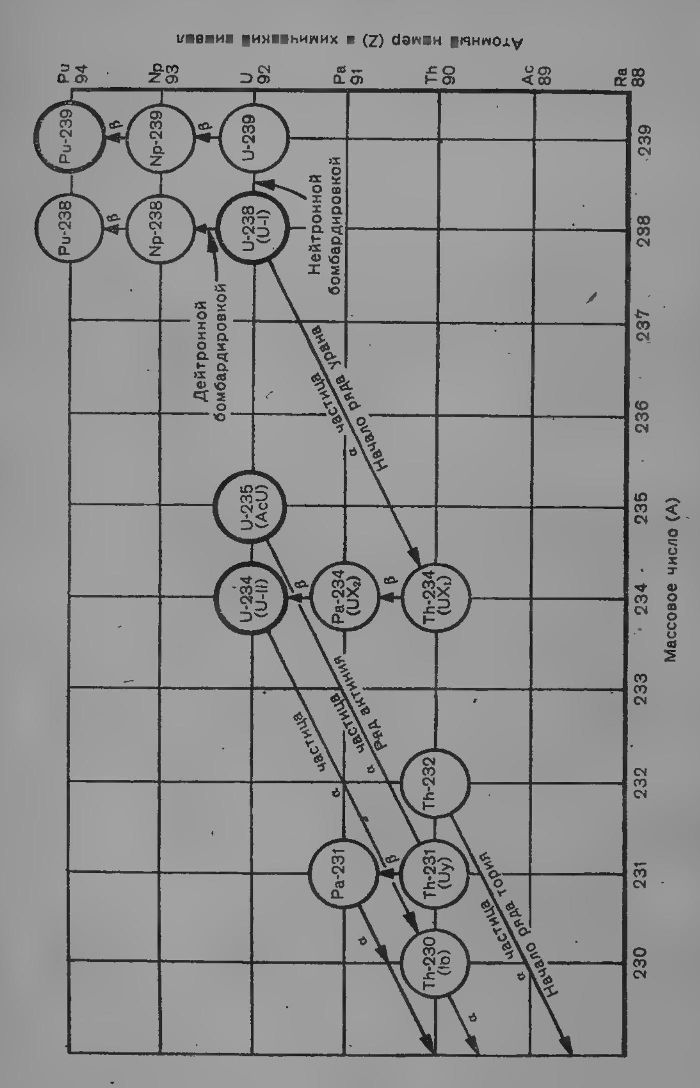


Рис. 1. Начальные участки трех естественных радиоактивных рядов и новые трансурановые элементы — нептуний и плутоний.

элемента. В частности, ему удалось превратить несколько атомов азота, бомбардируя их α-частицами, в атомы кислорода. Процесс можно представить в таком виде:

$$He^4 + N^{14} \rightarrow O^{17} + H^1.$$

Это символическое равенство означает, что ядро гелия с массовым числом 4 (α-частица), сталкиваясь с ядром азота, имеющим массовое число 14, дает ядро кислорода с массовым числом 17 и ядро водорода с массовым числом 1. Ядро водорода, называемое «протоном», играет особенно важную роль, так как из всех ядер, оно обладает наименьшей массой. Хотя в естественных радиоактивных процессах протоны не обнаруживаются, имеется много прямых указаний на то, что они могут быть выбиты из ядер.

НЕЙТРОН

1.18. В течение десятилетия, последовавшего за работами Резерфорда, было произведено много аналогичных экспериментов с подобными же результатами. Один ряд экспериментов этого типа привел к открытию нейтрона — частицы, свойства которой будут рассмотрены подробнее, так как именно она является основой в осуществлении всего проекта.

1.19. В 1930 г. В. Боте и Г. Беккер в Германии нашли, что когда очень быстрые естественные α-частицы из полония попадали на легкие элементы бериллий, бор и литий, то последние испускали излучение необычайно большой проникающей способности. Сперва это излучение было принято за γ-излучение, хотя оно было более проникающим, чем все известные γ-лучи, и объяснить с этой точки зрения детали результатов опыта было весьма трудно. Следующий важный шаг был сделан в 1932 г. в Париже Ирен Кюри и Ф. Жолио. Они показали, что если это неизвестное излучение попадает на парафин или на какое-нибудь другое соединение, содержащее водород, то это вещество выбрасывает протоны, обладающие очень большой энергией. Появление быстрых протонов само по себе не противоречило предположению, что новое излучение по своей природе состоит из γ-лучей, но эту гипотезу оказывалось все труднее и труднее примирить с детальным количественным анализом экспериментальных данных. Наконец (позднее, в 1932 г.), Дж. Чэдвик в Англии произвел ряд опытов, пока-

завших, что гипотеза γ-лучей несостоятельна. Он предположил, что в действительности новое излучение состоит из незаряженных частиц, масса которых приблизительно равна массе протона, и это предположение подтвердил рядом опытов. Такие незаряженные частицы называются теперь нейтронами.

1.20. Одной из особенностей нейтронов, отличающих их от других субатомных частиц, является отсутствие у них заряда. Это свойство нейтронов, задержавшее их открытие, делает невозможным их непосредственное наблюдение и придает им большую проникающую способность. Благодаря отсутствию заряда нейтроны являются важными агентами в ядерных превращениях. Атом, разумеется, в своем нормальном состоянии также незаряжен, но он в десять тысяч раз больше нейтрона и состоит из сложной системы отрицательно заряженных электронов, расположенных на больших расстояниях вокруг положительно заряженного ядра. Заряженные частицы, например, протоны, электроны или α-частицы, и электромагнитные излучения (например, γ-лучи), проходя через вещество, теряют энергию. При этом возникают электрические взаимодействия, сопровождающиеся ионизацией атомов вещества. (Именно благодаря такому процессу ионизации воздух становится электропроводным на пути электрических искр или вспышек молнии). Энергия, затраченная на ионизацию, равна энергии, потерянной заряженными частицами, которые при этом замедляются, или γ-лучами, которые при этом поглощаются. Однако, такие силы действовать на нейтрон не могут; на него может оказывать влияние лишь сила очень близкого действия, т. е. сила, проявляющая себя только тогда, когда нейтрон подходит к атомному ядру на очень малое расстояние. Это те же силы, которые удерживают вместе составные части ядра, несмотря на силы взаимного отталкивания положительных зарядов внутри него.

Свободный нейтрон движется беспрепятственно до тех пор, пока он не испытает «лобового» столкновения с атомным ядром. Так как ядра очень малы, то такие столкновения происходят довольно редко, и до столкновения нейтрон проходит длинный путь. В случае столкновения «упругого» типа обычный закон сохранения количества движения применяется таким же образом, как и в случае упругого удара биллиардных шаров. Если масса ядра, воспринявшего удар, велика, то оно приобретает относительно ма-

лую скорость; но если удар воспринят протоном, масса которого приблизительно равна массе нейтрона, то протон полетит вперед, получив значительную часть начальной скорости нейтрона, который сам соответственно замедлится. Можно обнаружить при этом атомы отдачи, образовавшиеся в результате этих столкновений, так как они заряжены и вызывают ионизацию.

Отсутствие электрического заряда у нейтрона затрудняет не только его обнаружение, но и управление им. Заряженные частицы могут быть ускорены, замедлены или отклонены электрическим или магнитным полями; на нейтроны же последние совершенно не действуют. Свободные нейтроны могут быть получены только в результате распада атомных ядер; естественного источника их нет. Единственный способ управления свободными нейтронами — поставить на их пути ядра, которые будут их замедлять и отклонять или поглощать при столкновениях. Как мы увидим, эти явления имеют величайшее практическое значение.

ПОЗИТРОН И ДЕЙТРОН

1.21. В 1932 г. был открыт не только нейтрон, но также и позитрон. Позитрон впервые наблюдался К. Д. Андерсоном в Технологическом институте в Калифорнии. Масса его равна массе электрона, заряд по абсолютной величине такой же, как и у электрона, но имеет положительный знак.

Позитрон для нас интересен лишь как частица, испускаемая искусственными радиоактивными ядрами.

1.22. 1932 год был отмечен также другим важным открытием. Г. К. Юри, Ф. Г. Брикуэдде и Дж. М. Мерфи обнаружили у водорода изотоп с массовым числом 2, содержащийся в естественном водороде в количестве 1 : 5000. Благодаря особому значению этого тяжелого изотопа водорода, ему дали специальное название — «дейтерий», а соответствующее ядро назвали дейтроном. Подобно α-частице, дейтрон не является одной из основных частиц, но он играет важную роль в некоторых процессах, вызывающих распад ядра.

СТРОЕНИЕ ЯДРА

1.23. Все элементы состоят из нескольких основных частиц — мысль уже не новая. Теперь это твердо установлено. Мы считаем, что существуют три основные частицы — нейтрон, протон и элек-

трон. В фундаментальных работах обычно рассматривают еще позитрон, о котором мы уже упоминали, нейтрино и мезотрон. Дейтрон и α-частица — о них мы уже тоже говорили — являются сложными частицами, играющими важную роль.

1.24. Согласно нашим современным взглядам, ядра всех атомов состоят из нейтронов и протонов. Число протонов равно атомному номеру Z. Число нейтронов, N, равно разности между массовым числом и атомным номером, т. е. $A - Z$.

Существуют два вида сил, действующих на эти частицы: обычные кулоновские силы электрического отталкивания между положительными зарядами и силы притяжения между всеми частицами, действующие на очень малых расстояниях. Последние силы не вполне изучены, и мы не будем пытаться рассматривать их. Достаточно сказать, что результирующее действие этих сил притяжения и отталкивания таково, что устойчивы только некоторые комбинации нейтронов и протонов. Если число нейтронов и протонов невелико, то комбинация устойчива, когда их количества примерно равны. Для бо́льших ядер относительное число нейтронов, необходимых для устойчивости, больше. Наконец, в конце периодической таблицы, где число протонов свыше 90 и число нейтронов — около 150, не существует вполне устойчивых ядер. (Некоторые из тяжелых ядер почти устойчивы, что подтверждается их очень большими периодами полураспада). Если искусственно образовать неустойчивое ядро путем добавления лишнего нейтрона или протона, то, в конце концов, происходит превращение, приводящее к устойчивому ядру. Как ни странно, это превращение сопровождается выбрасыванием не протона или нейтрона, а позитрона или электрона; повидимому, внутри ядра протон превращается в нейтрон и позитрон (или нейтрон превращается в протон и электрон), а легкая заряженная частица выбрасывается. Другими словами, массовое число остается тем же самым, но атомный номер меняется. Условия устойчивости не очень строги, так что для данного массового числа, т. е. для данного общего числа протонов и нейтронов, может существовать несколько устойчивых расположений протонов и нейтронов (максимум три или пять), дающих несколько изобар. Для данного атомного номера, т. е. для данного числа протонов, условия могут варьироваться в еще более широких пределах, так что некоторые

из тяжелых элементов имеют десять или двенадцать устойчивых изотопов. Известно около двухсот пятидесяти различных устойчивых ядер, для которых массовое число колеблется от единицы до двухсот тридцати восьми, а атомный номер — от единицы до девяносто двух.

1.25. Все высказанные нами утверждения основаны на экспериментальных данных. Теория ядерных сил пока не завершена, но на основе принципов квантовой механики она была развита настолько, чтобы с ее помощью можно было объяснить не только описанные выше наблюдения, но и более подробные эмпирические данные об искусственной радиоактивности и о различиях между ядрами с четными и нечетными массовыми числами.

ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

1.26. Выше мы упоминали об испускании позитронов или электронов ядрами, стремящимися к устойчивости. Испускание электронов (β-лучей) уже было известно из изучения естественных радиоактивных веществ, но испускания позитронов для таких веществ обнаружено не было. В действительности, общие рассуждения, изложенные выше, были основаны частично на данных, которые выходят за рамки настоящего отчета. Однако, мы дадим краткое описание открытия «искусственной» радиоактивности и того, что мы о ней знаем.

1.27. В 1934 г. Кюри и Жолио сообщили о том, что некоторые легкие элементы (бор, магний, алюминий), подвергнутые бомбардировке α-частицами, в течение известного времени продолжали испускать позитроны после того, как бомбардировка была прекращена. Другими словами, в результате бомбардировки α-частицами бор, магний и алюминий становились радиоактивными. Кюри и Жолио измерили периоды полураспада радиоактивных веществ, образовавшихся под действием α-частиц; они оказались равными 14 минутам, 2,5 минутам и 3,25 минутам соответственно.

1.28. Результаты, полученные Кюри и Жолио, послужили стимулом для проведения подобных опытов во всем мире. В частности, Э. Ферми пришел к выводу, что нейтроны, благодаря отсутствию у них заряда, должны сравнительно легко проникать и внутрь тех ядер, которые имеют высокие атомные номера и в сильной степени отталкивают протоны и α-частицы. Свое пред-

положение он смог почти сразу подтвердить, обнаружив, что ядро атома, подвергшегося бомбардировке, захватывало нейтрон и что таким образом получалось неустойчивое ядро, которое затем приходило в устойчивое состояние путем испускания электрона. Следовательно, конечное устойчивое ядро имело массовое число на единицу выше, а также атомный номер на единицу выше, чем первоначальное ядро-мишень.

1.29. В результате множества опытов, проведенных с 1934 г., мы можем теперь получать радиоактивные изотопы почти каждого элемента периодической таблицы. Некоторые из них возвращаются к устойчивому состоянию испусканием позитронов, некоторые — испусканием электронов, некоторые — при помощи процесса, известного под названием захвата *K*-электрона, которого мы рассматривать не будем, и небольшое число ядер (вероятно три) становятся снова устойчивыми благодаря испусканию α-частицы. Всего наблюдалось примерно пятьсот неустойчивых ядерных видов, и в большинстве случаев их атомные номера и массовые числа были установлены.

1.30. Искусственные радиоактивные элементы играют важную роль не только в осуществлении всего проекта, в котором мы заинтересованы, — их будущее значение в медицине, в химии «меченых атомов» и во многих других областях научно-исследовательской работы вряд ли можно переоценить.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

ЭНЕРГИЯ ЯДЕРНЫХ СВЯЗЕЙ

1.31. При описании радиоактивности и строения атома мы умышленно умолчали о количественных данных и не упомянули о приложениях принципа эквивалентности массы и энергии, который мы провозгласили руководящим принципом настоящего отчета. Теперь пришло время сказать не только об общих принципах, но и о количественных деталях.

1.32. Мы уже говорили об устойчивых и неустойчивых ядрах, состоящих из совокупности протонов и нейтронов, удерживаемых вместе ядерными силами. Для разрушения устойчивой системы необходимо произвести работу — это общий физический принцип. Так, если группа нейтронов и протонов устойчива, на разделение

составляющих ее частиц должна быть затрачена энергия. Если действительно энергия и масса эквивалентны, то общая масса устойчивого ядра должна быть меньше общей массы отдельных протонов и нейтронов, которые его составляют. Эта разность масс должна быть эквивалентна энергии, необходимой для полного разрушения ядра и называемой энергией связи. Вспомним, что массы всех ядер являются «приблизительно» целыми числами; небольшие отличия от целых чисел играют большую роль.

1.33. Возьмем, например, α-частицу; она устойчива. Так как ее массовое число четыре, а атомный номер два, то она состоит из двух протонов и двух нейтронов. Масса протона 1,00758, масса нейтрона 1,00893 (см. Приложение 2), так что общая масса отдельных компонент ядра гелия равна

$$2 \times 1{,}00758 + 2 \times 1{,}00893 = 4{,}03302,$$

тогда как масса самого ядра гелия 4,00280. Пренебрегая двумя последними знаками, мы получим числа 4,033 и 4,003 с разностью в 0,030 единицы массы. Эта разность и выражает «энергию связи» протонов и нейтронов в ядре гелия. Она кажется малой, но, обращаясь к уравнению Эйнштейна, $E = mc^2$, мы видим, что небольшое количество массы эквивалентно большому количеству энергии. Действительно, 0,030 единицы массы равны $4{,}5 \cdot 10^{-5}$ *эрг* на ядро, или $2{,}7 \cdot 10^{19}$ *эрг* на грамм-молекулу гелия. В единицах, более знакомых инженеру или химику, это означает, что для разрушения всех ядер атомов гелия в одном грамме гелия потребовалось бы затратить $1{,}62 \cdot 10^{11}$ *кал* или 190 000 kWh энергии. Наоборот, если бы можно было свободные протоны и нейтроны сгруппировать в ядро гелия, эта энергия освободилась бы.

1.34. Очевидно, стоит изучать возможность получения энергии путем соединения протонов и нейтронов или превращения ядра одного вида в другое. Приступим теперь к обзору современных знаний об энергиях связи различных ядер.

МАССОВЫЕ СПЕКТРЫ И ЭНЕРГИИ СВЯЗИ

1.35. Определение химического атомного веса дает средний атомный вес большого числа атомов данного элемента. Если элемент обладает не одним изотопом, то химический атомный вес не пропорционален массе отдельных атомов. Масс-спектрограф, по-

строенный Ф. В. Астоном и другими на основе более раннего прибора Дж. Дж. Томсона, измеряет массы отдельных изотопов. Именно этими измерениями было доказано существование изотопов и показано, что на шкале атомных весов массы всех видов атомов очень близки к целым числам. Эти целые числа, найденные экспериментально, являются массовыми числами, которые мы определили выше и которые представляют собою суммы количеств протонов и нейтронов; их открытие значительно содействовало укреплению мысли о том, что все ядра суть комбинации нейтронов и протонов.

1.36. Результаты, полученные с помощью усовершенствованного масс-спектрографа для нескольких случаев ядерных реакций, дают точные величины энергий связи для многих видов атомов во всем диапазоне атомных масс. Эта энергия связи, B, пропорциональна разности между истинной массой ядра, M, и суммой масс всех нейтронов и протонов в ядре. Мы имеем

$$B = (ZM_p + NM_n) - M,$$

где M_p и M_n — соответственно, массы протона и нейтрона, Z — количество протонов, $N = A - Z$ — количество нейтронов и M — истинная масса ядра. Изучение энергии связи, приходящейся на одну частицу, B/A, представляет бо́льший интерес, чем изучение самого B. Такое изучение показывает, что, если оставить в стороне вопрос о колебаниях в легких ядрах, энергия связи на частицу имеет тенденцию к быстрому возрастанию до плоского максимума в окрестности $A = 60$ (никель) и затем опять к постепенному уменьшению. Очевидно, ядра в средней части периодической таблицы (ядра с массовыми числами от 40 до 100) связаны сильнее всего. В ядерных реакциях, при которых частицы результирующего ядра связаны сильнее, чем частицы первоначального ядра, энергия будет выделяться. Говоря на языке термохимии, такие реакции будут экзотермическими. Таким образом, вообще, можно получить выигрыш энергии путем комбинации легких ядер для образования более тяжелых, или путем расщепления очень тяжелых ядер на два или три меньшие осколка. Кроме того, существует несколько особых случаев экзотермических распадов ядра; это относится к первым десяти или двенадцати элементам

периодической таблицы, где энергия связи на частицу изменяется неравномерно от одного элемента к другому.

1.37. До сих пор мы, как будто, нагромождали одно предположение на другое. Сперва мы приняли, что масса и энергия эквивалентны; теперь мы предполагаем, что атомные ядра можно перегруппировать с последующим уменьшением их общей массы: при этом освобождается энергия, которая может быть использована. Сейчас уместно будет поговорить о некоторых экспериментах, убедивших физиков в справедливости этих положений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ЭНЕРГИИ И МАССЫ

1.38. Как мы уже сказали, работы Резерфорда в 1919 г. по искусственному расщеплению ядер были продолжены множеством аналогичных экспериментов. Постепенное усовершенствование высоковольтной техники позволило заменить естественные α-частицы искусственно получаемыми быстрыми ионами водорода или гелия. Дж. Д. Кокрофту и Э. Т. С. Уолтону в лаборатории Резерфорда первым удалось осуществить ядерные превращения подобными методами. В 1932 г. они бомбардировали мишень лития протонами с энергией в 700 kV и обнаружили, что в результате бомбардировки из мишени выбрасывались α-частицы. Ядерную реакцию, которая при этом имела место, можно записать символически следующим образом:

$$_3Li^7 + {_1H^1} \longrightarrow {_2He^4} + {_2He^4},$$

где нижние индексы представляют положительные заряды ядер (атомные номера), а верхние индексы — количества протонов и нейтронов в ядрах (массовые числа). Как и в химическом уравнении, сумма количеств в левой части должна быть равна сумме количеств в правой части; таким образом сумма нижних индексов 4 и сумма верхних индексов 8 для обеих частей в отдельности одна и та же.

1.39. В это уравнение не вошли ни масса, ни энергия. Ударяющий протон и результирующие α-частицы обладают каждая кинетической энергией. Масса двух α-частиц не в точности равна сумме масс протона и атома лития. Сумма массы и энергии должна оставаться постоянной до и после реакции. Массы были найдены из массовых спектров. Слева ($Li^7 + H^1$) они составили в сумме 8,0241, справа ($2He^4$) 8,0056, так что 0,0185 единицы массы

в процессе реакции исчезли. Экспериментально определенные энергии α-частиц дали приблизительно 8,5 миллионов eV (электрон-вольт) каждая; в сравнении с этой величиной кинетической энергией ударяющего протона можно пренебречь. Таким образом 0,0185 единицы массы исчезло, а 17 MeV кинетической энергии появилось. Но 0,0185 единицы массы равно $3{,}07 \cdot 10^{-26}$ *г*, 17 MeV равны $27{,}2 \cdot 10^{-6}$ *эрг*, а c равно $3 \cdot 10^{-10}$ *см/сек* (см. Приложение 2). Если мы подставим эти величины в уравнение Эйнштейна, $E = mc^2$, то слева будем иметь $27{,}2 \cdot 10^{-6}$ *эрг*, а справа $27{,}6 \cdot 10^{-6}$ *эрг*, так что уравнение удовлетворяется с хорошим приближением. Другими словами, эти экспериментальные результаты доказывают, что эквивалентность массы и энергии правильно формулирована Эйнштейном.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

МЕТОДЫ БОМБАРДИРОВКИ ЯДЕР

1.40. Кокрофт и Уолтон получали протоны с достаточно большой энергией путем ионизации газообразного водорода и последующего ускорения ионов высоковольтной установкой с трансформатором и выпрямителем. Подобный же метод можно использовать для получения дейтронов с большой энергией из дейтерия или α-частиц с большой энергией из гелия. Более высокие значения энергии могут быть получены путем ускорения ионов в циклотронах или в генераторах Ван-де-Граафа. Однако, для получения γ-излучения с большой энергией или — что важнее всего — нейтронов, в качестве источников необходимо пользоваться самими ядерными реакциями. Излучения достаточно высокой энергии испускаются некоторыми естественными радиоактивными элементами или при некоторых случаях бомбардировки. Нейтроны обычно получаются бомбардировкой бериллия или бора естественными α-частицами или бомбардировкой подходящих мишеней протонами или дейтронами. Самым обычным источником нейтронов является смесь радия и бериллия, где α-частицы радия и продуктов его распада проникают в ядра Be^9, которые затем отдают нейтроны и превращаются в устойчивые ядра C^{12} (обыкновенный углерод). Для получения нейтронов часто используют удары быстро движущихся дейтронов о лед из «тяжелой» воды. Здесь

дейтроны, летящие с большой скоростью, ударяют в дейтроны мишени и вызывают появление нейтронов и ядер He^3. Применяется также полдюжина других реакций, в которых в качестве мишени участвуют дейтерий, литий, бериллий или бор. Заметим, что во всех этих реакциях общее массовое число и общее число зарядов не меняются.

1.41. Итак, агентами, оказавшимися способными вызывать ядерные реакции, являются следующие (в примерном порядке их важности): нейтроны, дейтроны, протоны, α-частицы, γ-лучи и, в редких случаях, более тяжелые частицы.

РЕЗУЛЬТАТЫ БОМБАРДИРОВКИ ЯДЕР

1.42. Большинство атомных ядер может допускать проникновение атомных частиц по меньшей мере одного типа (или γ-излучения). Каждое такое проникновение может вызвать перегруппировку ядра, во время которой выбрасывается основная частица (протон или нейтрон) или происходит излучение, либо осуществляется то и другое. Получившееся в результате ядро может оказаться одним из естественных устойчивых видов или, что более вероятно, атомом иного типа, который радиоактивен и превращается в новое ядро. Это последнее, в свою очередь, может быть радиоактивным и в этом случае опять будет распадаться. Процесс продолжается до тех пор, пока все ядра не превратятся в устойчивые. Искусственные радиоактивные вещества отличаются от естественных в двух отношениях: многие из них испускают позитроны (неизвестные в естественной радиоактивности) и очень немногие испускают α-частицы. Во всех случаях, когда производились точные измерения, была доказана эквивалентность массы и энергии и постоянство общей суммы массы-энергии. (Иногда для сохранения массы-энергии необходимо привлечь для рассмотрения нейтрино).

ОБОЗНАЧЕНИЕ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ

1.43. Полное описание ядерной реакции должно включать: природу, массу и энергию ударяющей частицы, затем природу (массовое число и атомный номер), массу и энергию (обычно нулевую) частицы-мишени, далее, природу, массу и энергию выброшенной частицы (или излучения) и, наконец, природу, массу и

энергию остатка. Но все это редко известно, и для многих целей полное описание не является необходимым. Часто для ядерной реакции пользуются обозначением, в котором сперва обозначена мишень химическим символом и массовым числом (если оно известно), затем частица, служащая для бомбардировки в качестве снаряда, далее, частица, которая выбрасывается, и, наконец, остаток. По этой схеме нейтрон обозначается буквой n, протон—буквой p, дейтрон — d, α-частица — α и γ-лучи — γ. Таким образом радие-бериллиевая нейтронная реакция может быть записана так: $Be^9(d, n)C^{12}$, а дейтрон-дейтронная реакция — так: $H^2(d, n)He^3$.

ТИПЫ РЕАКЦИИ

1.44. Рассматривая пять различных частиц (n, p, d, α, γ) как в качестве снарядов, так и в качестве испускаемых частиц, мы можем ожидать осуществления двадцати пяти возможных сочетаний. В действительности же дейтрон в качестве продукта реакции встречается очень редко, а фотон вызывает реакции только двух типов. Существует, однако, несколько других типов реакций, такие как (n, 2n), (d, H^3) и деление, которые доводят общее количество известных типов до приблизительно двадцати пяти. Стоит особо упомянуть о реакции (n,γ), так как она весьма важна в одном процессе, который будет нас особенно интересовать. Она часто называется реакцией радиационного захвата, так как нейтрон остается в ядре, и испускается лишь γ-излучение.

ВЕРОЯТНОСТЬ И ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ

1.45. До сих пор ничего не было сказано о вероятности ядерных реакций. В действительности, вероятность меняется в широких пределах. Нет никакой гарантии того, что нейтрон или протон, направленный в ядро, проникнет внутрь него. Это зависит от ядра и от ударяющей частицы. В ядерной физике вероятность какого-нибудь события принято выражать при помощи «поперечного сечения». Статистически, центры атомов в тонком слое можно рассматривать как точки, равномерно распределенные по плоскости. Частица, направленная в атом, ударяясь в эту плоскость, имеет определенную геометрическую вероятность того, что центр ее пройдет внутри круга радиуса r с центром в какой-нибудь из этих точек. Если на площади A плоскости имеется n

атомных центров, то эта вероятность есть $n\pi r^2/A$, что является просто отношением суммарной площади всех кружков радиуса r, описанных вокруг точек, ко всей площади. Если рассматривать атомы как непроницаемые стальные диски, а ударяющуюся частицу как пулю пренебрежимо малого диаметра, то это отношение есть вероятность попадания пули в какой-нибудь стальной диск, т. е. вероятность остановки атомного снаряда слоем. Если предметом измерения служит доля тех из ударяющих частиц, которые проходят *сквозь* слой, то полученное поперечное сечение можно назвать полным тормозным поперечным сечением атомов. Это понятие можно распространить на всякое взаимодействие между ударяющей частицей и атомами мишени. Например, вероятность того, что α-частица, попавшая в мишень-бериллий, вырвет из ядра нейтрон, можно заменить эквивалентным поперечным сечением бериллия для реакции этого типа.

1.46. В ядерной физике принято считать, что диаметры сталкивающихся частиц пренебрежимо малы. Поэтому научное определение поперечного сечения для любого ядерного процесса выражается так:

$$\frac{\text{число происходящих процессов}}{\text{число первоначальных частиц}} = \begin{array}{l}(\text{число ядер в мишени на } см^2) \times \\ \times (\text{поперечное сечение ядра в } см^2).\end{array}$$

Следует заметить, что это определение дано для поперечного сечения на ядро. Поперечные сечения могут быть вычислены для любого процесса, например, для захвата, рассеяния, вырывания нейтронов и т. д. Во многих случаях число частиц, испускаемых или рассеиваемых в ядерных процессах, не измеряется непосредственно; измеряют только ослабление параллельного пучка первоначальных частиц, вызванное помещением на его пути определенного вещества известной толщины. Поперечное сечение, полученное таким путем, называется полным поперечным сечением и обозначается буквой σ.

1.47. Как указывалось в параграфе 1.11, диаметр ядра имеет порядок 10^{-12} *см*. Мы можем поэтому ожидать, что для ядерных реакций поперечные сечения будут порядка $\pi d^2/4$ или, грубо, 10^{-24} *см*^{2}, и эта величина обычно служит единицей для их выражения. Фактически же наблюдаемые поперечные сечения меняются в очень широких пределах. Так, для медленных нейтронов,

в реакциях (n, γ), поперечное сечение в некоторых случаях достигает величины $1000 \cdot 10^{-24}$ *см*^{2}, а для превращений, происходящих в результате поглощения γ-лучей, поперечные сечения имеют порядок $^1/_{1000} \cdot 10^{-24}$ *см*^{2}.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ В 1939 г.

НЕБОЛЬШОЙ МАСШТАБ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1.48. Мы говорили свободно об эквивалентности массы и энергии и о ядерных реакциях, таких, например, как реакция действия протонов на литий, когда высвобождается энергия в сравнительно больших количествах. Теперь спросим себя, почему атомные силовые установки не возникли во всем мире в тридцатых годах? В конце концов, коль скоро мы можем получить $2{,}76 \cdot 10^{-5}$ *эрг* из атома лития, разрушенного протоном, мы могли бы ожидать получения, примерно, полмиллиона киловатт-часов, комбинируя один грамм водорода с семью граммами лития. Это выглядит заманчивее, чем сжигание угля. Трудности заключаются здесь в получении быстрых протонов и в управлении освобождаемой энергией. Все эксперименты, о которых мы говорили, были проделаны с весьма малыми количествами веществ, которых, конечно, было достаточно много по количеству атомов, но бесконечно мало в обычных единицах массы — не тонны или граммы, а миллионные доли грамма. Величина энергии, требовавшейся для выполнения эксперимента, была всегда значительно больше энергии, освобождаемой в процессе ядерной реакции.

1.49. Нейтроны весьма действенны для осуществления ядерного распада. Почему они не применялись? Если их первоначальным источником был пучек ионов, обстреливающий мишень, то имели место ограничения, разобранные в предыдущем параграфе. Если же применялся радиево-бериллиевый источник, то трудность состояла в том, что радий встречается в природе в очень малых количествах.

НЕОБХОДИМОСТЬ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ

1.50. Обычные наши источники энергии, кроме солнца и воды, суть химические реакции — сжигание угля и нефти. Эти реак-

ции освобождают энергию в результате перегруппировок в внешних электронных оболочках атомов — тот же процесс, который дает энергию нашему телу. Горение есть самораспространяющийся процесс; так, если зажечь спичку, то выделившегося тепла хватит для воспламенения окружающего топлива, которое выделит еще тепло, зажигающее топливо дальше, и т. д. В описанных нами выше ядерных реакциях это, вообще говоря, не так: ни выделившейся энергии, ни вновь образовавшихся частиц не достаточно для поддержания реакции. Но мы можем представить себе ядерные реакции, сопровождающиеся испусканием частиц того же вида, что и частицы, вызвавшие эти реакции, и притом в количестве, достаточном для продолжения реакции в соседних ядрах. Такая саморазвивающаяся реакция называется «цепной реакцией», и такие условия должны быть достигнуты, если энергию ядерных реакций мы желаем применять в большом масштабе.

ПЕРИОД ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.51. Хотя в тридцатых годах атомные силовые установки не были построены, было много открытий в области ядерной физики и достаточно много чисто теоретических работ. Г. Бете выдвинул теорию для объяснения образования теплоты солнца посредством цикла ядерных превращений, в которых участвуют углерод, водород, азот и кислород; этот цикл реакций в конечном счете приводит к образованию гелия *). Теперь эта теория общепринята. Открытие нескольких ядерных реакций типа (n, 2n) (т. е. реакций, которые вызываются нейтронами и сами производят нейтроны) указывало на то, что при соответствующих условиях может начаться саморазвивающаяся цепная реакция. Много было разговоров об атомной энергии; некоторые рассуждения велись

---

*) Ряд постулированных реакций был такой:

(1) ${}_6C^{12} + {}_1H^1 \longrightarrow {}_7N^{13}$

(2) ${}_7N^{13} \longrightarrow {}_6C^{13} + {}_1e^0$

(3) ${}_6C^{13} + {}_1H^1 \longrightarrow {}_7N^{14}$

(4) ${}_7N^{14} + {}_1H^1 \longrightarrow {}_8O^{15}$

(5) ${}_8O^{15} \longrightarrow {}_7N^{15} + {}_1e^0$

(6) ${}_7N^{15} + {}_1H^1 \longrightarrow {}_6C^{12} + {}_2He^4$.

Конечный результат — превращение водорода в гелий и позитроны (обозначенные через ${}_1e^0$) и выделение около тридцати миллионов электрон-вольт энергии.

также и об атомных бомбах. Но последний важный шаг в этот подготовительный период был сделан лишь после четырех лет ошибок и исканий. Некоторые талантливые физики исследовали действие бомбардировки нейтронами ядер урана, самого сложного из всех известных элементов. Результаты были поразительны, но вызвали недоумение. История их постепенного истолкования представляет собой запутанный и сугубо специальный, но увлекательный рассказ о теории и эксперименте. Оставляя в стороне ранние несостоятельные объяснения, мы сразу перейдем к окончательному объяснению, которое, как это часто бывает, сравнительно просто.

ОТКРЫТИЕ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР УРАНА

1.52. Как уже упоминалось, нейтрон оказался частицей, наиболее пригодной для осуществления ядерных превращений. Особенно это относилось к элементам с самыми высокими атомными номерами и атомными весами; у этих элементов большой заряд ядра обусловливает значительные отталкивательные силы, действующие на дейтроны или протоны, но не действующие на незаряженные нейтроны. Результаты бомбардировки урана нейтронами оказались интересными и загадочными. Изученные впервые в 1934 г. Ферми и его сотрудниками, эти результаты были правильно объяснены лишь через несколько лет.

1.53. 16 января 1939 года Нильс Бор (Копенгаген, Дания) прибыл в США, чтобы провести несколько месяцев в Принстоне (Нью-Джерси); он с нетерпением ждал случая обсудить некоторые теоретические вопросы с А. Эйнштейном. (Четыре года спустя Бор вынужден был бежать из оккупированной нацистами Дании на маленьком пароходе). Как раз перед тем, как Бор покинул Данию, двое из его сотрудников О. Р. Фриш и Л. Мейтнер (оба эмигранты из Германии) поделились с ним своей догадкой о том, что поглощение нейтрона ядром урана иногда вызывает расщепление этого ядра на две приблизительно равные части, сопровождающееся освобождением колоссальных количеств энергии; этот процесс стал вскоре называться «делением» ядра. Поводом для этой гипотезы послужило важное открытие О. Гана и Ф. Штрасмана в Германии (опубликовано в первых числах янва-

ря 1939 г. в журнале *Naturwissenschaften*), которые доказали, что при действии нейтронов на уран получается изотоп бария. Немедленно по приезде в Соединенные Штаты Бор сообщил эту мысль своему ученику Дж. А. Уилеру и другим в Принстоне, — а от них эта новость постепенно стала известна физикам соседних городов, в частности Э. Ферми в Колумбийском университете. В результате бесед между Ферми, Дж. Р. Данингом и Дж. Б. Пеграмом, в Колумбии были предприняты поиски больших ионизационных импульсов, которых следовало ожидать от летящих осколков уранового ядра. 26 января 1939 г. в Вашингтоне состоялась конференция по теоретической физике, созванная Вашингтонским университетом и институтом Карнеги в Вашингтоне. Ферми покинул Нью-Йорк, чтобы принять участие в этой конференции, раньше, чем были проделаны в Колумбийском университете опыты по делению ядра.

На конференции Бор и Ферми обсуждали проблему деления, и, в частности, Ферми упомянул, что могут испускаться нейтроны. Хотя это было лишь догадкой, из нее с очевидностью вытекала возможность цепной реакции. По вопросу о делении в печати был опубликован ряд сенсационных статей. Прежде чем конференция в Вашингтоне закончилась, было предпринято несколько других экспериментов, чтобы подтвердить наличие деления ядер, и в четырех лабораториях (Колумбийский университет, Институт Карнеги в Вашингтоне, Университет Джона Гопкинса, Калифорнийский университет) это было экспериментально подтверждено, о чем сообщалось в *Physical Review* от 15 февраля 1939 г. К этому времени Бор узнал о том, что подобные же эксперименты были произведены в его лаборатории в Копенгагене около 15 января. (Письмо Фриша в *Nature*, от 16 января 1939 г., опубликованное в номере от 18 февраля). В *Comptes Rendus* (Париж) 30 января 1939 г. Ф. Жолио также опубликовал свои первые результаты.

С тех пор непрерывный поток научных докладов о делении ядер не прекращался, так что к тому времени, когда Тэрнер написал большую обзорную статью на эту тему (6 декабря 1939 г.), напечатанную в *Reviews of Modern Physics*, появилось уже около сотни научных докладов. Полный анализ и обсуждение этих работ даны в статье Тэрнера и в других местах.

ОБЩЕЕ РАССМОТРЕНИЕ ВОПРОСА О ДЕЛЕНИИ

1.54. Рассмотрим предположение Фриша и Мейтнер в свете двух главных закономерностей, обнаруженных в строении ядра: во-первых, относительное число нейтронов в ядре возрастает с атомным номером; во-вторых, энергия связи, отнесенная к частице, достигает максимума для ядер с промежуточными атомными номерами. Допустим, что ядро U-238 распалось точно пополам (рис. 2); тогда, пренебрегая массой первоначального нейтрона,

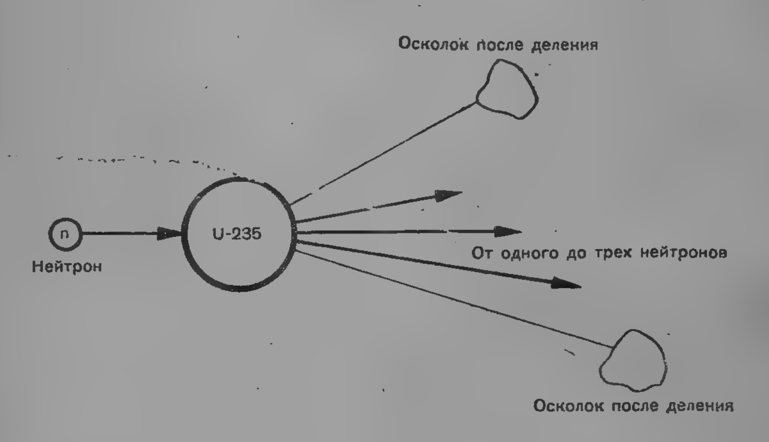


Рис. 2.

мы получим два ядра с атомным номером 46 и массовым числом 119. Самый тяжелый устойчивый изотоп палладия ($Z=46$) имеет массовое число лишь 110. Следовательно, чтобы достигнуть устойчивости, два воображаемые новые ядра должны выбросить девять нейтронов, превратившись в ядра $_{46}Pd^{110}$; или четыре нейтрона в каждом ядре должны превратиться в протоны, испуская электроны, тем самым образуя устойчивые ядра олова с массовым числом 119 и атомным номером 50; могут осуществиться и другие какие-либо комбинации этих испусканий и превращений, дающие некоторые новые пары устойчивых ядер. В действительности, как показали Ган и Штрасман на примере бария ($Z = 56$, $A =$ от 135 до 140), как продукта деления, расщепление происходит таким образом, что получаются две неравные части с массовыми числами около 140 и 90, с испусканием нескольких нейтронов и последующим

радиоактивным распадом путем испускания электронов, которое не прекращается до тех пор, пока не образуются устойчивые ядра. Вычисления на основании данных об энергии связи показывают, что всякая такая перегруппировка дает общую результирующую массу, значительно меньшую, чем первоначальная масса ядра урана, и таким образом должно освободиться большое количество энергии.

1.55. Очевидно, из явления деления вытекали три главные следствия: освобождение энергии, получение радиоактивных веществ и возможность нейтронной цепной реакции. Выделившаяся энергия могла обнаружиться в кинетической энергии осколков деления и в последующем радиоактивном распаде продуктов. Возможность нейтронной цепной реакции зависела от того, выбрасывались ли фактически нейтроны, что нуждалось в исследовании.

1.56. Таковы были задачи, возникшие благодаря открытию деления. О характере этих задач сообщалось в журналах в 1939 и 1940 г.г., а с тех пор результаты исследований в значительной мере сохранялись в тайне. Изучение самого процесса деления ядер, включая получение нейтронов и быстрых осколков, выполнялось в основном физиками с помощью счетчиков, камер Вильсона и т. д. Изучение продуктов деления и определение их природы производились главным образом химиками, которым приходилось быстро разделять субмикроскопические количества веществ и совершать повторные определения периодов полураспада неустойчивых изотопов.

Резюмируем состояние научных знаний к июню 1940 года. Основные факты о ядерном делении открыты и сделаны достоянием научного мира. Цепная реакция не осуществлена, но ее возможность — по крайней мере в принципе — ясна, и намечены несколько путей, которые могли бы привести к цели.

СОСТОЯНИЕ НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ В ИЮНЕ 1940 г.

ТВЕРДО УСТАНОВЛЕННЫЕ И ОБЩЕИЗВЕСТНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ДЕЛЕНИИ

1.57. Все перечисленные ниже сведения были общеизвестны к июню 1940 г. в Соединенных Штатах и за границей:

(1) Три элемента — уран, торий и протактиний — при бомбардировке их нейтронами иногда расщепляются на приблизительно

равные осколки, являющиеся изотопами элементов средней части периодической таблицы, от селена ($Z = 34$) до лантана ($Z = 57$).

(2) Большинство осколков неустойчиво; осколки претерпевают радиоактивный распад последовательным испусканием β-частиц, переходя через ряд элементов к различным устойчивым изотопам.

(3) Осколки обладают очень большой кинетической энергией.

(4) Деление тория и протактиния вызывается только быстрыми нейтронами (со скоростями порядка тысяч миль в секунду).

(5) Деление урана может быть вызвано как быстрыми, так и медленными (тепловыми) нейтронами; тепловые нейтроны вызывают деление только U-235, но не U-238; быстрые нейтроны обладают меньшей вероятностью расщепить U-235, чем медленные (тепловые) нейтроны.

(6) При некоторых скоростях поперечное сечение захвата нейтронов U-238, приводящее к образованию U-239, но не к делению, велико.

(7) Энергия, освобождаемая при делении ядра урана, составляет около 200 миллионов электрон-вольт.

(8) В процессе деления выбрасываются быстрые нейтроны.

(9) Среднее количество нейтронов, испускаемых при одном делении, составляет от одного до трех.

(10) Очень быстрые нейтроны теряют энергию путем неупругих соударений с ядрами урана; при этом какие-либо ядерные реакции не происходят.

(11) Бо̀льшая часть этих сведений находилась в согласии с полуэмпирической теорией строения ядра, разработанной Бором и Уилером и другими; это говорило о том, что предсказания, основанные на этой теории, должны оправдаться.

ПРЕДПОЛОЖЕНИЕ О ДЕЛЕНИИ ПЛУТОНИЯ

1.58. Казалось вероятным, что радиационный захват нейтронов ураном-238 должен приводить, после двух последовательных β-превращений, к образованию ядра с $Z = 94$ и $A = 239$. Выводы из теории Бора-Уилера и некоторые эмпирические соотношения, установленные Л. А. Тэрнером и другими, подсказывали, что это

ядро должно быть довольно устойчиво, испускать α-частицы и делиться при бомбардировке тепловыми нейтронами. Позднее в частных письмах и беседах стали появляться догадки о важности такого теплового деления для поддержания цепной реакции. В современных обозначениях и при существующем уровне наших знаний эта реакция запишется так:

$$_{92}U^{238} + {_0n^1} \longrightarrow {_{92}U^{239}} \longrightarrow {_{93}Np^{239}} + {_{-1}e^0},\ {_{93}Np^{239}} \longrightarrow {_{94}Pu^{239}} + {_{-1}e^0},$$

где Np и Pu — химические символы двух новых элементов, нептуния и плутония; $_0n^1$ — нейтрон, а $_{-1}e^0$ — обычный (отрицательный) электрон. Плутоний-239, по предположению, может делиться под действием тепловых нейтронов. Это будет подробно рассмотрено в последующих главах.

ОБЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ФИЗИКИ ЯДРА

1.59. К 1940 году ядерные реакции напряженно изучались уже свыше десяти лет. Было опубликовано несколько обзорных статей и издано несколько книг по ядерной физике. Для получения и управления частицами, которыми обстреливается ядро, для изучения искусственной радиоактивности, а также для разделения ничтожно малых количеств химических элементов, получаемых при ядерных реакциях, была разработана новая техника. Массы изотопов были точно определены. Были также измерены поперечные сечения захвата нейтронов. Были разработаны способы замедления нейтронов. Наблюдались физиологические действия нейтронов; они даже были испытаны для лечения рака. Все подобные сведения были известны всем, но они были весьма неполны. Много было еще пробелов и неточностей. Техника была слишком громоздка, а количества имеющихся веществ были ничтожно малы. Хотя основные принципы были ясны, теория изобиловала непроверенными допущениями, и производить вычисления было трудно. Предсказания, сделанные в 1940 г. разными физиками, одинаково известными и талантливыми, часто сильно расходились. Предмет исследований во многом напоминал скорее искусство, чем науку.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ

1.60. Оглядываясь на 1940 год, мы видим, что все предпосылки для серьезных попыток решения проблемы производства атомных

бомб и управления атомной энергией были налицо. Была доказана эквивалентность массы и энергии. Было доказано, что нейтроны, начав деление урана, сами воспроизводились при этом процессе, и что, поэтому, могла осуществиться, с силою взрыва, расходящаяся цепная реакция. Разумеется, никто не знал, можно ли будет достичь требуемых условий но многие ученые ясно представляли себе все проблемы и возможные пути их решения. Следующая глава дает постановку задач и помогает понять достижения последних пяти лет.

ГЛАВА II

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

ВВЕДЕНИЕ

2.1.Со времени первых открытий, показавших, что при ядерных реакциях выделяются большие количества энергии, и до открытия деления урана, идея использования атомной энергии, или даже создания атомных бомб, время от времени обсуждалась в научных кругах. Открытие деления сделало как будто эту идею более обоснованной, но использование атомной энергии казалось все еще делом отдаленного будущего, и у многих ученых было инстинктивное чувство, что в действительности атомная энергия не сможет когда-либо быть использована. В течение 1939 и 1940 г.г. многие известные ученые в своих публичных выступлениях обращали внимание на громадное количество энергии, заключенной в уране, которую можно было бы использовать как для взрыва, так и для управляемого производства энергии; благодаря этому U-235 приобрел большую известность и стал нарицательным именем больших событий в будущем. Возможность военного применения деления урана привлекла внимание правительства США (см. гл. III). В марте 1939 г. на конференции с представителями Военно-морского министерства Ферми указал на возможность осуществления управляемой реакции при использовании медленных нейтронов и реакции взрывного характера—при использовании быстрых нейтронов. Он подчеркнул, однако, что имеющиеся данные еще недостаточны для точных предсказаний.

2.2. Летом 1940 г. появилась возможность ясно сформулировать задачу, хотя еще невозможно было ответить на отдельные конкретные вопросы или даже решить, будет ли когда-либо осуществлена цепная реакция. В настоящей главе мы осветим

состояние проблемы во всей ее полноте. Для большей ясности мы используем некоторые сведения, которые на самом деле были получены позднее.

ПРОБЛЕМА ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ

2.3. Принцип действия атомных бомб или силовой установки, использующей деление урана, достаточно прост. Если один нейтрон вызывает деление, которое приводит к освобождению нескольких новых нейтронов, то число делений может чрезвычайно быстро возрасти с выделением огромных количеств энергии (рис. 3). Возможность такого нарастания определяется относительной вероятностью ряда процессов. Нейтроны, освобождаемые в процессе деления, могут вылететь из области пространства, занятой ураном, могут быть захвачены ураном в процессе, приводящем к делению, или же могут быть захвачены посторонними примесями. Таким образом, вопрос о том, будет или не будет развиваться цепная реакция, зависит от результата соревнования между четырьмя процессами:

(1) Вылет нейтронов из урана,
(2) захват нейтронов ураном без деления,
(3) захват нейтронов примесями,
(4) захват нейтронов ураном с делением.

Если потеря нейтронов в первых трех процессах меньше количества нейтронов, освобождаемых в четвертом, то цепная реакция происходит; в противном случае она невозможна. Очевидно, какой-либо из первых трех процессов может иметь такую большую вероятность в данном расположении, что избыток нейтронов, освобождаемых при делении, не в состоянии обеспечить продолжение реакции. Например, в том случае, когда процесс (2) — захват ураном без деления — имеет намного большую вероятность, чем захват с делением, цепная реакция невозможна.

2.4. Дополнительная трудность заключается в том, что естественный уран состоит из трех изотопов: U-234, U-235 и U-238, содержащихся в количествах, приблизительно 0,006, 0,7 и 99,3%, соответственно. Мы уже видели, что вероятности процессов (2) и (4) различны для разных изотопов. Мы видели также, что эти вероятности различны для нейтронов, обладающих различными энергиями.

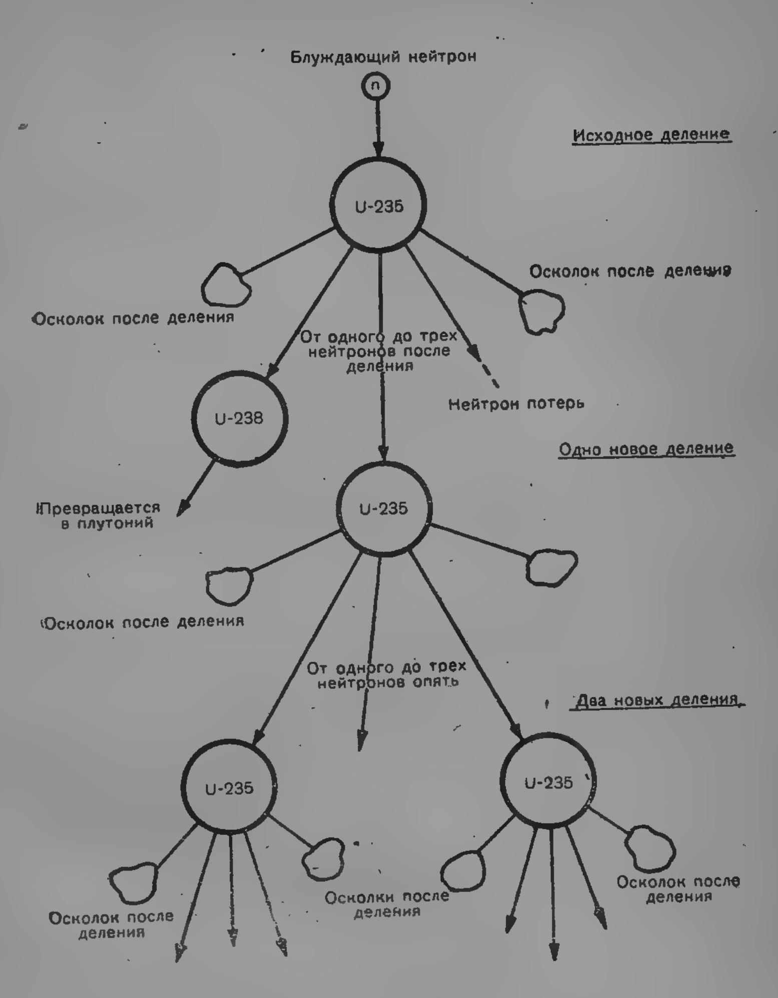


Рис. 3. Схема цепной реакции деления без учета влияния скоростей нейтронов. В взрывной реакции число нейтронов неограниченно возрастает. В управляемой реакции число нейтронов увеличивается до определенного уровня и затем остается постоянным.

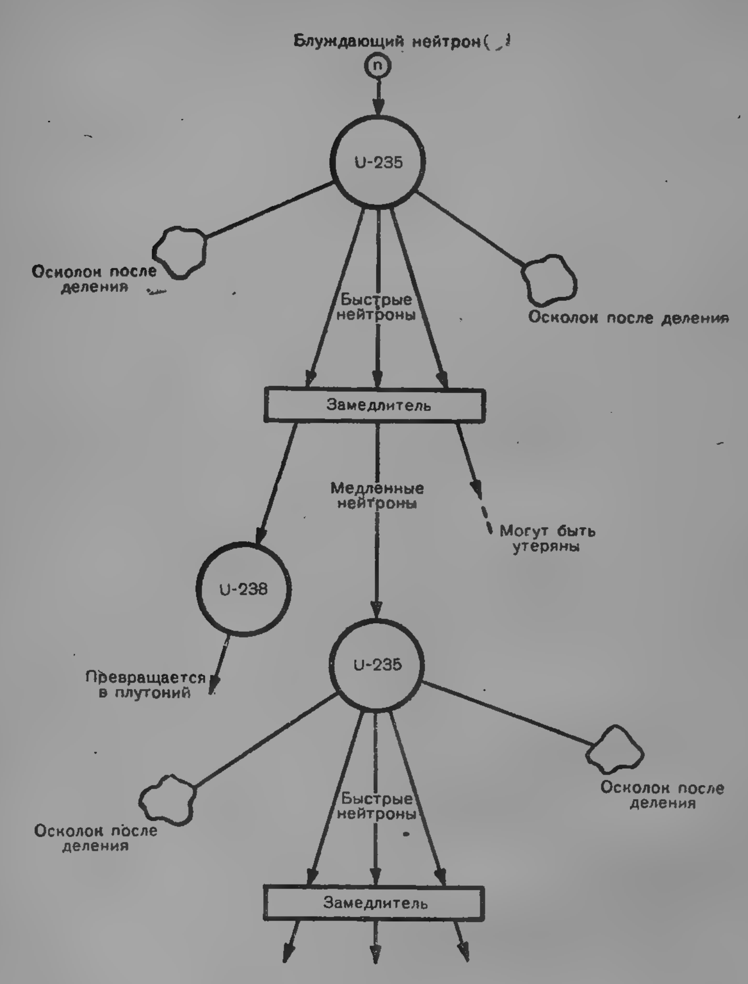


Рис. 4. Схема цепной реакции деления с применением замедлителя для замедления нейтронов до скоростей, при которых они в состоянии вызывать деления.

2.5. Рассмотрим теперь ограничения, налагаемые первыми тремя процессами, и средства, при помощи которых можно уменьшить их влияние.

ВЫЛЕТ НЕЙТРОНОВ ИЗ УРАНА; КРИТИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ

2.6. Относительное количество нейтронов, которые вылетают из урана, может быть уменьшено изменением размеров и формы. В сфере поверхностные эффекты пропорциональны квадрату, а объемные — кубу радиуса. Вылет нейтронов из урана является поверхностным эффектом, зависящим от величины поверхности; захват с делением происходит во всем объеме, занимаемом материалом, и поэтому является объемным эффектом. Чем больше количество урана, тем меньше, поэтому, вероятность того, что вылет нейтронов из объема урана будет преобладать над захватами с делением и препятствовать цепной реакции. Потеря нейтронов на захваты без деления является объемным эффектом, подобно освобождению нейтронов при захвате с делением, так что увеличение размеров не изменяет их относительной важности.

2.7. Критические размеры устройства, содержащего уран, можно определить как размеры, при которых количество освобождаемых при делении нейтронов в точности равно их потере вследствие вылета и захватов, не сопровождающихся делением. Другими словами, если размеры меньше критических, то, по определению, цепная реакция не может развиться. Принципиально уже в 1940 г. можно было определить критические размеры, однако неточность в определении необходимых для расчета постоянных была практически столь велика, что разные их оценки отличались друг от друга в очень широких пределах. Не была исключена возможность, что критические размеры могли оказаться слишком большими для практических целей. Даже сейчас оценки для проектируемых установок время от времени изменяются в некоторых пределах по мере получения новых данных.

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЧИСЛА ЗАХВАТОВ БЕЗ ДЕЛЕНИЯ

2.8. В главе I мы указали, что тепловые нейтроны обладают наибольшей вероятностью производить деление U-235 и что нейтроны, испускаемые в процессе деления, имеют большие ско-

рости. Разумеется, было бы слишком большим упрощением сказать, что цепная реакция может продолжаться тогда, когда при делении освобождается большее число нейтронов, чем поглощается. В самом деле, вероятности захвата с делением и захвата без деления зависят от скоростей нейтронов. К сожалению, скорость, при которой захват без деления наиболее вероятен, находится между скоростью нейтронов, испускаемых в процессе деления, и скоростью, при которой захват с делением наиболее вероятен.

2.9. В течение нескольких лет до открытия деления общепринятый способ замедления нейтронов состоял в том, что их заставляли пройти через вещество с малым атомным весом, например, какой-нибудь из материалов, содержащих водород. Процесс замедления представляет собой процесс упругого соударения частицы, имеющей большую скорость, и частицы, практически находящейся в состоянии покоя. Чем ближе масса нейтрона к массе ударяемой частицы, тем большую долю своей кинетической энергии теряет нейтрон. Поэтому легкие элементы наиболее эффективны в качестве «замедлителей», т. е. веществ, уменьшающих скорость нейтронов.

2.10. Многие физики считали, что можно было бы смешать уран с замедлителем для того, чтобы быстрые нейтроны за время между их освобождением при делении урана и встречей с ядрами урана могли уменьшить свою скорость до значения меньшего, чем скорость, при которой очень велика вероятность захвата без деления. Хороший замедлитель должен обладать малым атомным весом и не иметь тенденции поглощать нейтроны. Литий и бор не удовлетворяют второму требованию. Гелий трудно применить, потому что он является газом и потому что он не образует никаких соединений. Для выбора замедлителя, поэтому, остаются водород, дейтерий, бериллий и углерод. Даже теперь ни одно из этих веществ не может быть исключено. Предложение об использовании графита в качестве замедлителя исходило от Э. Ферми и Л. Сциларда.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЧИСЛА ЗАХВАТОВ БЕЗ ДЕЛЕНИЯ

2.11. Общая схема применения замедлителя, смешанного с ураном, совершенно очевидна. Специальный прием употребления

замедлителя был впервые предложен в США, — насколько нам известно, Ферми и Сцилардом. Идея заключалась в применении кусков урана значительных размеров, включенных в виде пространственной решетки в материал замедлителя. Такая система имеет значительные преимущества перед однородной смесью. Когда константы были определены более точно, появилась возможность теоретически вычислить наиболее эффективный тип решетки.

УМЕНЬШЕНИЕ ЧИСЛА ЗАХВАТОВ БЕЗ ДЕЛЕНИЯ ПУТЕМ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ

2.12. В главе I было установлено, что для нейтронов в определенном диапазоне скоростей (соответствующем энергиям в несколько электрон-вольт) U-238 имеет большое поперечное сечение захвата для образования U-239, но не для деления. Существует также значительная вероятность неупругих (т. е. не приводящих к захвату) столкновений быстрых нейтронов с ядрами U-238. Таким образом присутствие U-238 приводит к уменьшению скорости быстрых нейтронов и к поглощению нейтронов с умеренными скоростями. Хотя случаи захвата без деления ядрами U-235 могут также иметь место, все же очевидно, что если бы мы могли отделить U-235 от U-238 и избавиться от U-238, то нам удалось бы уменьшить число захватов без деления и, таким образом, добиться развития цепной реакции. Вероятность деления U-235 быстрыми нейтронами может оказаться достаточно большой, чтобы сделать ненужным применение замедлителя, коль скоро U-238 удален.

К сожалению, U-235 содержится в природном уране только в отношении приблизительно 1 : 140, а относительно малое различие масс обоих изотопов затрудняет разделение. В 1940 г. разделение изотопов в большом масштабе было осуществлено только для водорода, массы двух изотопов которого относятся друг к другу, как 1 : 2. Тем не менее, возможность выделения U-235 из обычного урана была с самого начала признана весьма важной, и разделение изотопов урана стало одним из двух основных направлений приложения усилий в течение последующих пяти лет.

ПРОИЗВОДСТВО И ОЧИСТКА МАТЕРИАЛОВ

2.13. Выше было установлено, что поперечное сечение захвата нейтронов меняется в очень широких пределах у различных ве-

ществ. У некоторых оно очень велико по сравнению с максимальным поперечным сечением урана. Для осуществления цепной реакции необходимо уменьшить захват нейтронов примесями до такого значения, когда он не сможет оказать существенного влияния. Это требует очень тщательной очистки металлического урана и замедлителя. Вычисления показывают, что максимально допустимые концентрации многих элементов-примесей составляют несколько частей на миллион как для урана, так и для замедлителя. Если вспомнить, что до 1940 г. все производство металлического урана в США не превышало нескольких граммов вещества сомнительной чистоты, что все количество добытого в США металлического бериллия достигало лишь нескольких фунтов, что все производство концентрированного дейтерия составляло не более нескольких фунтов и что углерод никогда до этого не производился в тех количествах и с той степенью очистки, какие необходимы для замедлителя, — станет ясным, что проблема производства и очистки материалов была весьма важна.

УПРАВЛЕНИЕ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИЕЙ

2.14. Все проблемы, рассмотренные выше, относятся лишь к осуществлению цепной реакции. Если для такой реакции хотят найти целесообразное применение, то нужно уметь управлять ею. Проблема управления ставится по разному, в зависимости от того, что мы хотим получить: постепенное освобождение энергии или взрыв. Непрерывное производство атомной энергии требует проведения цепной реакции на медленных нейтронах в смеси урана и замедлителя, в то время как для атомной бомбы необходима цепная реакция на быстрых нейтронах, которая происходит в U-235 или Pu-239, хотя в них могут иметь место оба типа деления. Казалось правдоподобным, даже в 1940 г., что, применяя вещества, поглощающие нейтроны, удастся управлять цепной реакцией. Казалось также достаточно ясным, хотя и не совсем достоверным, что такая цепная реакция должна быть самоограничивающейся ввиду более низкого значения вероятности захвата, сопровождаемого делением, при достижении высоких температур. Тем не менее, не было исключено, что цепная реакция может выйти из под контроля, и, поэтому, казалось необходимым проведение опытов по цепным реакциям в ненаселенной местности.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ

2.15. До сих пор мы рассматривали, каким образом можно осуществить ядерную цепную реакцию и управлять ею, не затрагивая вопроса о том, как ее использовать. Технологический разрыв между получением управляемой цепной реакции и использованием ее в качестве мощного источника энергии или взрывчатого вещества подобен разрыву, существовавшему между открытием огня и производством паровозов.

2.16. Несмотря на то, что производство энергии никогда не было главной целью этих работ, достаточное внимание было уделено выяснению главной трудности — установлению режима работы при высокой температуре. Эффективная тепловая машина должна быть не только источником теплоты, но развивать ее при высокой температуре. Проведение цепной реакции при высокой температуре и превращение тепла в полезную работу значительно более трудно, чем проведение цепной реакции при низкой температуре.

2.17. Доказательства возможности осуществления цепной реакции еще недостаточно для уверенности в том, что ядерная энергия будет эффективна в бомбах. Для получения эффективного взрыва необходимо, чтобы цепная реакция развивалась чрезвычайно быстро; в противном случае лишь незначительное количество ядерной энергии будет использовано до того, как бомба разлетится на части и реакция прекратится. Необходимо предотвратить, кроме того, преждевременный взрыв. Эта проблема полной «детонации» была и все еще остается одной из самых трудных проблем при создании высокоэффективной атомной бомбы.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛУТОНИЯ

2.18. До сих пор рассматривались только возможности применения самого урана. Мы уже упоминали о предположении, что элемент с атомным номером 94 и массой 239, обычно называемый плутонием, мог бы оказаться очень эффективным. Действительно, теперь уже известно, что он по своей ценности приближается к чистому U-235. Мы упоминали о трудности отделения U-235 от более распространенного изотопа U-238. Эти два изотопа в химическом отношении, конечно, тождественны. Однако плутоний, хотя и получается из U-238, является отличным в химическом

отношении элементом. Поэтому, если возможен процесс превращения U-238 в плутоний, то *химическое отделение* плутония от урана может оказаться более практичным, чем *разделение изотопов* U-235 и U-238.

2.19. Предположим, что удалось создать управляемую цепную реакцию в решетке из обычного урана и замедлителя, например, углерода в виде графита. Тогда, в процессе цепной реакции, при делении U-235 испускаются нейтроны, и многие из них поглощаются U-238. В результате этого образуется U-239, каждый атом которого испускает β-частицу, превращаясь в нептуний ($_{93}Np^{239}$). Нептуний, в свою очередь, испускает β-частицу, превращаясь в плутоний ($_{94}Pu^{239}$); этот последний после α-распада снова превращается в U-235, но так медленно, что его можно практически рассматривать, как устойчивый элемент (см. рис. 1). Если после длительного протекания реакции смесь металлов изолировать, то окажется возможным выделить плутоний химическими методами и после очистки употребить его в цепной реакции с делением, имеющей взрывной характер.

ОБОГАЩЕННЫЕ КОТЛЫ

2.20. Мы говорили о трех способах увеличения возможности осуществления цепной реакции: применении замедлителя, получении материалов высокой чистоты, использовании таких специальных материалов, как U-235 или Pu-239. Эти три способа не исключают друг друга, и было предложено много схем с применением небольших количеств выделенных U-235 или Pu-239 в решетках, состоящих в основном из обычного урана или окиси урана и замедлителя или двух различных замедлителей. Эти устройства обычно называются «обогащенными котлами».

ПРИМЕНЕНИЕ ТОРИЯ, ПРОТАКТИНИЯ ИЛИ ДРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

2.21. Все предыдущие рассуждения концентрировались вокруг того или иного использования урана; однако, известно, что как торий, так и протактиний также подвергаются делению при бомбардировке быстрыми нейтронами. Большим преимуществом урана, по крайней мере для предварительных работ, является его

восприимчивость к медленным нейтронам. Другим двум элементам уделялось немного внимания. Протактиний можно исключить, так как он редко встречается в природе. Торий относительно часто встречается, однако и он не имеет явных преимуществ перед ураном.

2.22. Не следует забывать, что теоретически многие ядерные реакции могут быть использованы для получения энергии. В настоящее время мы не можем указать другого пути возбуждения и управления реакциями, помимо применения реакций деления; однако может случиться, что лабораторным путем будет воспроизведена одна из тех реакций синтеза, о которых уже упоминалось, как об источнике солнечной энергии.

НЕОБХОДИМЫЕ КОЛИЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ

2.23. Летом 1940 г. невозможно было итти дальше догадок относительно количеств материалов, необходимых для осуществления:

(1) цепной реакции с применением замедлителя,

(2) бомбы, основанной на использовании цепной реакции в чистом или по меньшей мере в обогащенном U-235 или плутонии.

В то время в качестве критических размеров бомбы обычно назывались цифры от одного до ста килограммов U-235, который должен был быть выделен из природного урана, взятого в количестве, по крайней мере, в 140 раз большем. Было почти очевидно, что для проведения цепной реакции с медленными нейтронами потребуются тонны урана и замедлителя.

ДОСТУПНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

2.24. Данные о составе земной коры указывают на значительное содержание урана и тория (около $4:10^6$ урана и около $12:10^6$ тория по весу). В настоящее время известны залежи урановой руды в Колорадо, в районе Большого Медвежьего озера (Северная Канада), в Иоахимстале (Чехословакия) и в Бельгийском Конго. Известны многие другие месторождения урановой руды, однако их размеры в большинстве случаев не разведаны. Уран

всегда встречается вместе с радием, хотя и в значительно больших количествах. Оба часто встречаются вместе с ванадиевыми рудами.

2.25. Торий тоже достаточно широко распространен и встречается в виде окиси тория в весьма большой концентрации в монацитовых песках, имеющихся кое-где в США, но главным образом в Бразилии и в Британской Индии.

2.26. По предварительным грубым оценкам, которые, вероятно, оптимистичны, ядерная энергия, содержащаяся в разведанных месторождениях урана, достаточна для удовлетворения всех энергетических потребностей США на 200 лет (предполагая использование как U-238, так и U-235).

2.27. Как уже было указано, до 1940 года металлического урана было произведено очень мало; сведения об уране были столь скудными, что даже точка плавления его оставалась неизвестной (например, в *Handbook of Physics and Chemistry* на 1943—1944 гг. указано только, что точка плавления находится ниже 1850° С в то время, как в настоящее время известно, что она лежит вблизи 1150°). Очевидно, поскольку речь идет об уране, не было непреодолимых трудностей в получении сырья и в производстве металла, однако очень серьезным вопросом было, сколько это займет времени, и во что обойдется производство необходимого количества чистого металла.

2.28. Из материалов, упомянутых выше в качестве пригодных для замедлителей, наиболее очевидными преимуществами обладает дейтерий. Его содержание в обычном водороде составляет приблизительно 1 : 5000. К 1940 году были разработаны различные методы выделения его из водорода, и в США было получено для экспериментальных целей несколько литров. Единственное крупное производство было сосредоточено на Норвежском заводе, откуда было получено несколько сотен литров тяжелой воды (D_2O, окись дейтерия). Как и в отношении урана, решение проблемы зависело только от времени и денег.

2.29. Бериллий в виде силикатов широко распространен, однако лишь в малых по количеству руды месторождениях. В последние несколько лет он нашел широкое применение в качестве компонента в сплавах; однако, для такого применения нет нужды

в получении бериллия в виде металла. В 1940 г. в США было произведено только 700 фунтов этого металла.

2.30. В отношении углерода дело обстояло совсем по другому. В США ежегодно производилось много сотен тонн графита. Это являлось одной из причин, делавших графит желательным в качестве замедлителя. Трудности заключались в получении достаточного количества графита требуемой чистоты, в особенности в связи с возросшими потребностями военной промышленности.

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ И СТОИМОСТИ

2.31. Требования, связанные со средствами и временем, зависели не только от многих неизвестных научных и технологических факторов, но и от политических обстоятельств. Очевидно, для достижения конечной цели могли потребоваться годы и миллионы долларов. Почти все, чего добивались в это время, ограничивалось оценкой, сколько времени и сколько денег потребуется для выяснения научных и технологических перспектив. Казалось, что осуществление и развитие цепной реакции с тепловыми нейтронами в решетке из графита и урана в размерах, позволяющих ответить на вопрос о возможности протекания реакции в действительности, является не очень крупным предприятием. Оценка, сделанная тогда, определяла время, необходимое для получения ответа, сроком в один год и затраты—суммой в 100 000 долларов. Такая оценка относилась к созданию системы цепной реакции очень малой мощности без системы охлаждения и без всяких приспособлений для использования освобождающейся энергии.

ВРЕДНОСТЬ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ

2.32. Как уже давно известно, радиоактивные вещества вредно действуют на здоровье. Они испускают весьма проникающие γ-лучи, которые по своему физиологическому воздействию подобны рентгеновским лучам. Радиоактивные вещества испускают также α- и -лучи, которые хотя и не обладают большой проникающей способностью, но также могут нанести вред здоровью. Количество радия, употребляемое в госпиталях и в обычных физических установках, ограничивается лишь несколькими миллиграммами. Количество радиоактивных материалов,

получающихся при делении урана в сравнительно малых установках для цепных реакций, может быть эквивалентно сотням или тысячам граммов радия. Установка для цепной реакции испускает также интенсивное нейтронное излучение, которое по своему вредному действию на здоровье сравнимо с действием γ-лучей. Независимо от своих радиоактивных свойств, уран является в химическом отношении ядом. Таким образом, почти вся работа в этой области, в особенности при наличии цепных реакций и образующихся при этом радиоактивных продуктов, весьма вредна для здоровья.

МЕТОД ПОДХОДА К ЗАДАЧЕ

2.33. Были два пути разрешения проблемы. Один заключался в постановке ряда точных физических измерений поперечных сечений поглощения различных веществ для различных процессов, вызываемых нейтронами, и для различных энергий нейтронов. Коль скоро такие данные были бы получены, представлялось бы возможным рассчитать с достаточной точностью ход цепной реакции. Другой путь — чисто эмпирический — состоял в смешивании урана или его соединений различными способами с разными замедлителями и в наблюдении происходящих при этом процессов. Подобные же два крайние метода были возможны и в случае решения проблемы разделения изотопов. В действительности в обоих случаях применялся компромиссный способ.

ЭНЕРГИЯ ИЛИ БОМБА?

2.34. Предполагавшиеся военные преимущества урановых бомб внешне значительно эффектнее, чем преимущества использования урана в качестве источника энергии. Очевидно, что небольшое число урановых бомб может сыграть решающую роль в выигрыше войны стороной, впервые их применившей. Это очень хорошо понимали люди, работавшие в данной области; однако необходимым предварительным этапом развития наших знаний, казалось, было достижение цепной реакции с медленными нейтронами, и оно стало первоочередной задачей группы заинтересованных работников. Решение этой задачи казалось необходимым также для того, чтобы убедить военные власти и более скепти-

чески настроенных ученых в том, что вся идея не является просто фантастическим сном. Частью по этим соображениям, частью из-за чрезвычайной секретности идея атомной бомбы не появлялась более в письменных материалах между летом 1940 г. и осенью 1941 г.

ВОЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

2.35. Если все атомы килограмма U-235 подвергнутся делению, то освобожденная при этом энергия будет эквивалентна энергии, получающейся при взрыве 20 000 тонн тринитротолуола. Если критические размеры бомбы окажутся практически осуществимыми — в пределах, скажем, от одного до сотни килограммов — и все другие проблемы могут быть разрешены, останутся еще два вопроса. Первый, — какой процент способных к делению ядер успеет испытать деление прежде, чем реакция закончится, т. е. какова будет эффективность взрыва? Второй, — каково действие столь мощной концентрации освобождаемой энергии? Если даже будет освобожден только один процент теоретически возможной энергии, то порядок величины взрыва будет совершенно отличным от взрыва, происходящего при действии любых известных до настоящего времени бомб. Таким образом военные эксперты должны были весьма обстоятельно изучить вопрос о значении такой бомбы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ

2.36. Было установлено, (1) что деление урана происходит с освобождением большого количества энергии и (2) что в этом процессе освобождаются избыточные нейтроны, благодаря чему может начаться цепная реакция. То, что такая реакция должна будет происходить и что она может иметь важное военное применение в бомбах, не противоречило никакому из известных до того времени принципов. Однако, идея эта была новой и поэтому казалась сомнительной. Одно было несомненно — что изготовлению такой бомбы должно предшествовать разрешение ряда технических вопросов большой трудности. Вероятно, единственными материалами, пригодными для этих бомб, являются либо U-235, который должен быть отделен от в 140 раз более распространенного изотопа U-238, либо Pu-239, — изотоп совершенно неиз-

вестного до тех пор элемента -- плутония, который сам получается в управляемом процессе цепной реакции, также до того времени неизвестном. Было очевидно, что для получения управляемой реакции могла появиться необходимость производства металлического урана и тяжелой воды, бериллия или углерода и притом в больших количествах и высокой чистоты. Коль скоро материал для бомбы получен, необходимо технически разработать способ его безопасного и эффективного использования. В ряде процессов придется встретиться с необходимостью техники безопасности нового типа.

ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ПРОБЛЕМА

2.37. Организованный летом 1940 г. Комитет Исследований Национальной Обороны (National Defense Research Committee — NDRC) предложил многим ученым страны работать над различными важными военными проблемами. Количество ученых было ограниченное (хотя в то время это еще не было полностью осознано). Поэтому возникли значительные трудности при решении вопроса о масштабах, в которых должна вестись работа по атомной бомбе. В течение последующих четырех лет решения приходилось часто пересматривать. Обзор того, как осуществлялись эти решения, сделан в главах III и V.

ГЛАВА III

АДМИНИСТРАТИВНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ДЕКАБРЬ 1941 г.

ИНТЕРЕС К ВОЕННЫМ ВОЗМОЖНОСТЯМ

3.1. Как уже было изложено в главе I, сообщения о гипотезе деления ядра и ее экспериментальном подтверждении были опубликованы в январе 1939 г. Непосредственный интерес представляла возможность использования больших количеств энергии, освобождаемой в процессе деления, для военных целей. В это время использование науки в интересах войны было настолько необычно для американских ядерных физиков, что они едва ли представляли, что от них требуется. Первые усилия в деле ограничения публикации и обеспечения поддержки правительства были предприняты маленькой группой физиков-эмигрантов, состоявшей из Э. Вигнера, Э. Теллера, В. Ф. Вейскопфа и Э. Ферми и возглавлявшейся Л. Сцилардом.

ОГРАНИЧЕНИЯ ПУБЛИКАЦИИ

3.2. Весной 1939 г. указанная группа заручилась поддержкой Нильса Бора в попытке прекратить публикацию дальнейших данных путем добровольного соглашения. Ведущие американские и британские физики согласились с этим. Однако, Ф. Жолио, выдающийся французский ученый в области физики ядра, отказался, очевидно, в связи с опубликованием редакцией *Physical Review* письма, отправленного еще до того, как к соглашению присоединились все американцы. Вследствие этого в течение почти всего следующего года продолжалась беспрепятственная публикация работ, хотя несколько статей и было задержано самими авторами.

3.3. В апреле 1940 г. на заседании физического отделения На-

ционального Исследовательского Совета (National Research Council) Г. Брейт предложил образовать цензурный комитет для контроля статей, публикуемых во всех научных американских журналах. Хотя первоначальным мотивом этого предложения было стремление установить контроль над публикацией статей по делению урана, сформировавшийся несколько позднее Проверочный Комитет (при Национальном Исследовательском Совете) стал общим руководящим органом проведения издательской политики во всех областях, представлявших военный интерес. Председатель Комитета был Л. П. Эйзенхарт, члены: Г. Брейт, В. М. Кларк, Г. Флетчер, Э. Б. Фред, Дж. Б. Пеграм, Г. К. Юри, Л. Х. Уид и Э. Г. Уивер. Были организованы различные подкомитеты, из которых первый должен был заниматься делением урана. Председатель этого комитета был Г. Брейт, члены: Дж. В. Бимс, Л. Дж. Бригс, Дж. Б. Пеграм, Г. К. Юри и Э. Вигнер. Редакторы различных журналов должны были представлять копии статей, относящихся к указанной выше области, в случае сомнений в их допустимости к печати, либо непосредственно Г. Брейту, либо через Эйзенхарта. Брейт обычно рассылал статьи всем членам подкомитета для обсуждения допустимости их к печати и информировал о результатах редакторов. Эта организация оказалась очень успешной для контроля публикаций. В измененном виде она существовала номинально и в июне 1945 года. Фактически загруженность большинства физиков страны военной работой того или иного рода скоро свела на нет количество статей, подлежащих рассмотрению Комитета. Интересно отметить, что упомянутая цензурная организация была полностью добровольной. Можно приветствовать такое содружество ученых страны. Надо надеяться, что после войны появится возможность опубликовать хотя бы часть статей по указанным вопросам, чтобы авторы их получили должное признание своих заслуг.

ПЕРВЫЕ ОБРАЩЕНИЯ К ПРАВИТЕЛЬСТВУ. ПЕРВЫЙ КОМИТЕТ

3.4. Получение правительственной поддержки для проведения исследовательских работ по физике ядра оказалось делом гораздо более сложным. Первый контакт с правительством был установлен Пеграмом (Колумбийский университет) в марте 1939 г. Пеграм организовал конференцию представителей Военно-морского мини-

стерства с участием Ферми. Единственным результатом этой конференции было то, что Морское министерство заинтересовалось и просило регулярной информации.

Инициатива в следующей попытке заинтересовать правительство принадлежала Сциларду и Вигнеру. В июле 1939 г. они совещались с Эйнштейном, а несколько позже Эйнштейн, Вигнер и Сцилард обсудили вопрос с Александром Саксом (Нью-Йорк). Осенью Сакс, с письменной поддержкой Эйнштейна, объяснил президенту Рузвельту желательность поощрения работ по физике ядра. Президент назначил комитет, известный под названием «Консультативного комитета по урану» (Advisory Committee on Uranium) и состоявший из директора Бюро Стандартов Бригса (председатель), полковника К. Ф. Адамсона (Управление артиллерии армии) и капитана 3-го ранга Дж. С. Гувера (Управление артиллерии военно-морского флота). Комитету было поручено изучить вопрос. Это был единственный официальный комитет по урану до образования Исследовательского Комитета Национальной Обороны в июне 1940 г. Комитет часто заседал и привлекал ученых к своей работе.

3.5. Первое заседание Уранового Комитета состоялось в октябре 1939 г. с привлечением, помимо членов, следующих лиц: Ф. Л. Молера, А. Сакса, Л. Сциларда, Э. Вигнера, Э. Теллера и Р. Б. Робертса. Результатом этого заседания был доклад от 1 ноября 1939 г., представленный Бригсом, Адамсоном и Гувером президенту Рузвельту. Доклад содержал восемь предложений, детально перечислять которые здесь нет необходимости. Следует, однако, отметить, что в докладе специально упоминаются и атомная энергия, и атомная бомба, как реальные возможности. В докладе рекомендовалась закупка для измерений поперечного сечения поглощения углерода 4 тонн графита и 50 тонн окиси урана. Остальные рекомендации были или общего порядка или никогда не были выполнены. Повидимому, записка, составленная Сцилардом, послужила основой обсуждения на этом совещании.

3.6. О первой субсидии (6000 долларов) от армии и флота для закупки материалов, в соответствии с решениями, принятыми 1 ноября, Бригс доложил генералу Э. М. Ватсону (помощник президента Рузвельта) 20 февраля 1940 г. Следующее заседание Консультативного комитета по урану состоялось 28 апреля 1940 г.

в составе Сакса, Вигнера, Пеграма, Ферми, Сциларда, Бригса, адмирала Бауэна, полковника Адамсона и капитана 3-го ранга Гувера. Ко времени этого заседания возникли два новых важных фактора. Во-первых, было открыто, что деление урана, вызываемое нейтронами с тепловыми скоростями, происходит только в U-235. Во-вторых, было доложено, что немцы для исследований по урану выделили большую часть Института кайзера Вильгельма (Берлин). Несмотря на то, что лейтмотивом этого заседания было обеспечение наибольшего продвижения работ, определенных решений выработано не было. Было указано, что решающие измерения с углеродом в Колумбийском университете уже производятся и скоро дадут результаты, и было предложено воздержаться от выработки решений до получения этих результатов.

3.7. В течение последующих недель многие заинтересованные лица, в особенности Сакс, поставили вопрос о более эффективной поддержке работ и лучшей их организации. Их требования были подкреплены результатами, полученными в Колумбии (как указывается, например, в письме Сакса генералу Ватсону от 15 мая 1940 г.). Опыты в Колумбийском университете показали, что поглощающая способность углерода заметно ниже, чем предполагалось, и вероятность того, что углерод окажется удовлетворительным замедлителем, стала очень велика. Сакс интересовался также вопросами поставки руды. 1 июня 1940 г. Сакс, Бригс и Юри встретились с адмиралом Бауэном для обсуждения вопроса об установлении связи с руководством Union Minière Бельгийского Конго. Такая связь вскоре Саксом была установлена.

3.8. 15 июня 1940 г. специальная консультативная группа, созванная Бригсом в Национальном Бюро Стандартов, обсудила общее состояние проблемы. На заседании присутствовали: Бригс, Юри, М. А. Тьюв, Вигнер, Брейт, Ферми, Сцилард и Пеграм. «После детального обсуждения группой было вынесено пожелание Урановому комитету изыскать фонды для поддержки исследовательских работ по урано-углеродной системе. Работы должны были вестись по двум линиям:

А. Дальнейшие измерения ядерных констант, имеющих значение для предложенного типа реакции.

В. Эксперименты с количествами урана и углерода, составля-

ющими $^1/_5$—$^1/_4$ от количества, считающегося минимальным для осуществления самоподдерживающейся цепной реакции.

Было установлено, что для дальнейших измерений основных констант необходимо около 40 000 долларов и что для промежуточных экспериментов потребуется около 100 000 долларов на приобретение металлического урана и чистого графита». (Выдержка из записки Пеграма Бригсу от 14 августа 1940 г.).

РЕОРГАНИЗАЦИЯ КОМИТЕТА С ПОДЧИНЕНИЕМ ЕГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМУ КОМИТЕТУ НАЦИОНАЛЬНОЙ ОБОРОНЫ

3.9. Не успели указанные выше решения начать претворяться в жизнь, как был организован в июне 1940 г. Исследовательский Комитет Национальной Обороны (National Defense Research Committee). Президент Рузвельт дал указание о преобразовании Уранового Комитета в подкомитет Исследовательского Комитета Национальной Обороны (НДРК, председатель — Ванневар Буш). Реорганизованный Урановый Комитет имел следующий состав: Бригс (председатель), Пеграм, Юри, Бимс, Тьюв, Р. Гэн и Брейт. С одобрения Бригса, Брейт часто консультировался у Вигнера и Теллера, хотя они не были членами Комитета. С этого времени до лета 1941 г. комитет продолжал работать примерно с постоянным составом членов. Его пожелания передавались Бригсом в НДРК, и НДРК заключал соответствующие контракты с различными научно-исследовательскими институтами. Первые фонды, однако, поступили не от НДРК, а от армии и флота.

СУБСИДИРОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.10. Первый контракт был заключен с Колумбийским университетом на проведение работ по двум линиям, рекомендованным на заседании 15 июня, как указывалось выше. Проект ведения работ был утвержден Исследовательским Комитетом, и подписание контракта (NDCrc-32) состоялось 8 ноября 1940 года на срок с 1 ноября 1940 г. по 1 ноября 1941 г. Стоимость контракта составляла 40 000 долларов.

3.11. До вступления контракта в силу были сделаны очень незначительные затраты. На графит и кадмий было израсходовано, например, около 3200 долларов из суммы 6000 долларов, отпущенной армией и флотом в феврале 1940 г.

3.12. Мы не будем детально перечислять другие контракты,

заключенные до декабря 1941 г. Их количество и объем постепенно росли. Юри начал работать над разделением изотопов методом центрифугирования по контракту с флотом осенью 1940 г. Контракты были заключены с Колумбийским университетом, Принстонским университетом, фирмой Стандарт Ойл, Корнельским университетом, Институтом Карнеги в Вашингтоне, Миннезотским университетом, Колледжем штата Айова, Университетом Дж. Гопкинса, Национальным бюро стандартов, Виргинским университетом, Чикагским и Калифорнийским университетами. В течение зимы и весны 1940—41 г.г. и до ноября 1941 г. общее количество утвержденных контрактов составляло 16 на сумму 300 000 долларов.

3.13. Масштаб затрат является до некоторой степени показателем работы. Поэтому не лишено интереса сравнение цифр затрат с таковыми же в других областях военных исследований. К ноябрю 1941 г. общий, утвержденный Исследовательским Комитетом Национальной Обороны, бюджет для лаборатории излучения при Массачузетском технологическом институте составлял несколько миллионов долларов. Даже на такую сравнительно небольшую программу, как программа секции S отделения А Исследовательского Комитета, было израсходовано или было разрешено израсходовать 136 000 долларов на работы, которые являлись ценными, но которые не могли итти ни в какое сравнение с важностью работ по урану.

РЕОРГАНИЗАЦИЯ КОМИТЕТА ЛЕТОМ 1941 г.

3.14. Урановый Комитет в том виде, как он был образован летом 1940 года, оставался без существенных изменений до лета 1941 года, когда комитет был несколько расширен; в это время были созданы подкомитеты по разделению изотопов, по теоретическим вопросам, по вопросам производства энергии и тяжелой воды *). С этого времени Комитет стал называться Урановой

---

*) Секция урана: Бригс—председатель, Пеграм—заместитель председателя, Алисон, Бимс, Брейт, Смит, Юри.

Подсекция разделения изотопов: Юри—председатель, Бимс.

Подсекция производства энергии: Пеграм—председатель, Алисон, Ферми, Смит, Сцилард.

Подсекция тяжелой воды: Юри—председатель, Чилтон.

Подсекция теоретических вопросов: Ферми—председатель, Брейт, Экарт, Смит, Сцилард, Уилер.

секцией или Секцией S-1 НДРК (Исследовательского Комитета Национальной Обороны). Хотя формально реорганизованный Комитет не был расформирован до лета 1942 года, он был значительно преобразован в декабре 1941 года (см. главу V).

ОБЗОРНЫЙ КОМИТЕТ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК

3.15. Весной 1941 года Бригс, понимая необходимость в объективном обзоре проблемы, обратился к Бушу с просьбой об учреждении Обзорного комитета. Тогда Буш, в официальном письме к Ф. Б. Джюитту, президенту Национальной Академии Наук, просил назначить такой комитет. Джюитт согласился, назначив комитет в следующем составе: А. Х. Комптон — председатель; В. Д. Кулидж, Э. О. Лоуренс, Дж. К. Слэйтер, Дж. Г. Ван-Флек и Б. Герарди (из-за болезни Герарди работать не смог). Этот комитет должен был оценить военное значение проблемы урана и рекомендовать размеры затрат, необходимых для ее исследования.

3.16. В мае Обзорный комитет собрался и составил для Буша доклад. (Этот и последующие доклады будут резюмированы в следующей главе). На основе этого доклада и устного выступления Бригса на заседании НДРК, последним, на заседании 18 июля 1941 года, было утверждено ассигнование в 267 000 долларов и указано на возможность того, что потребуются более значительные расходы. Буш потребовал представления второго доклада, в котором было бы обращено особенное внимание на технические вопросы. Для того, чтобы удовлетворить этому требованию, в комитет были введены О. Э. Бэкли (телефонные лаборатории Бэлла) и Л. У. Чэб (Westinghouse Electrical and Manufacturing Co.) (Комптон был летом в Южной Америке и в летних заседаниях комитета не участвовал). Второй доклад был представлен Кулиджем. В результате новых измерений поперечного сечения деления U-235 и возросшей уверенности в том, что разделение изотопов возможно, Комптон и Лоуренс в сентябре 1941 г. указали члену НДРК Дж. Б. Конанту, тесно сотрудничавшему с Бушем, на целесообразность представления третьего доклада. Так как Буш и Конант узнали летом 1941 года о том, что англичане также смотрели на дело со все возрастающим оптимизмом, комитету было предложено снова изучить весь вопрос в целом. Для этого коми-

тет был значительно расширен введением в его состав В. К. Льюиса, Р. Мэлликена и Г. Б. Кистяковского. Этот третий доклад был представлен Комптоном 6 ноября 1941 года.

СВЕДЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ ОТ АНГЛИЧАН

3.17. Начиная с 1940 года существовал обмен материалами с англичанами. Летом 1941 г. англичане дали обзор своей работы за период с апреля до июля. Они также интересовались возможностью применения плутония: в письме Дж. Д. Кокрофта к Р. Г. Фаулеру от 28 декабря 1940 г. указывается на целесообразность изучения плутония. Фаулер, который в то время был английским уполномоченным в Вашингтоне по научным связям обеих стран, передал письмо Кокрофта Лоуренсу. Англичане никогда не развивали дальше возможности применения плутония, так как понимали, что свои ограниченные людские резервы они должны концентрировать на U-235. Чэдвик, по крайней мере, был убежден в том, что бомбу с U-235, обладающую большой разрушительной силой, изготовить можно, и вся группа английских ученых считала, что выделение U-235 путем диффузии, вероятно, осуществимо.

3.18. Сообщения о точке зрения англичан, включая и первый набросок английского доклада, содержащего обзор вопроса, стали неофициально известны Бушу и Конанту в течение лета 1941 г.; официальный же английский доклад от 15 июля был впервые передан Конанту Дж. П. Томсоном 3 октября. Но так как Национальная Академия Наук не имела в своем распоряжении английского обзора, то в ее докладах и в докладах англичан давались совершенно независимые оценки перспектив производства атомных бомб.

3.19. Наряду с официальными и полуофициальными совещаниями, состоялось много неофициальных обсуждений, из которых одно было связано с приездом из Англии в США летом 1941 года М. Л. Э. Олифанта. В качестве примера такого неофициального обсуждения можно упомянуть беседы между Конантом, Комптоном и Лоуренсом, имевшие место в сентябре 1941 года во время празднования пятидесятилетия Чикагского университета. Все были убеждены в необходимости ускорить осуществление программы, и эта мысль в разных вариантах сообщалась рядом лиц Бушу.

3.20. Осенью 1941 года Юри и Пеграм были командированы в Англию для того, чтобы из первоисточника узнать, как там обстояло дело. Это был первый случай, когда кто-либо из американцев был в Англии специально в связи с проблемами урана. Доклад, представленный Юри и Пеграмом, подтверждал и расширял сведения, полученные раньше.

РЕШЕНИЕ О РАСШИРЕНИИ И РЕОРГАНИЗАЦИИ

3.21. В результате докладов, которые были представлены Комитетом Национальной Академии Наук, британскими учеными и Юри и Пеграмом, а также по настоянию ряда физиков, Буш, как начальник Управления Научно-Исследовательских работ (ОСРД) (Office of Scientific Research and Development), в которое НДРК входит, как часть, решил, что работу по вопросам урана необходимо продвинуть вперед более энергично.

3.22. Прежде чем был составлен третий доклад Национальной Академии Наук и до того, как Пеграм и Юри посетили Англию, Буш передал все вопросы, связанные с ураном, на рассмотрение президенту Рузвельту и вице-президенту Уоллесу. Буш кратко изложил им сущность английской точки зрения, которая в общем была оптимистичной, и отметил ненадежность предсказаний. Президент согласился, что необходимо расширить программу работ, обеспечить иную организацию, изыскать средства из специального источника и осуществить обмен подробной информацией с англичанами. Было принято решение поручить обсуждение вопросов общей политики следующей группе: президент, вице-президент, военный министр, начальник генерального штаба, Буш и Конант. Эта группа часто упоминалась под названием Высшей Политической Группы (Top Policy Group).

3.23. Ко времени представления Национальной Академией третьего доклада и возвращения Юри и Пеграма из Англии начал вырисовываться общий план реорганизации. Как указывал Буш в письме к президенту Рузвельту от 27 ноября 1941 г., доклад Академии был сдержаннее, чем доклад англичан. Тем не менее, он был достаточно оптимистичен, чтобы поддержать план расширения работ. Предложенная реорганизация обсуждалась на собрании секции урана непосредственно перед нападением на Пирл Харбор, и описана в главе V.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ

3.24. На возможное военное значение деления урана уже через несколько недель после открытия явления, в марте 1939 г., было обращено внимание правительства. Осенью 1939 г. был создан первый правительственный комитет по урану. Весной 1940 г. был создан аппарат для ограничения публикации статей, имеющих значение в данной области. Когда в июне 1940 г. был учрежден НДРК, Урановый комитет был преобразован и передан НДРК. Однако, вплоть до осени 1941 г. общие затраты были сравнительно малы. В декабре 1941 г., после представления доклада Национальной Академией Наук и получения информации от англичан, было принято решение об изменении и расширении программы.

ГЛАВА IV

РАЗВЕРТЫВАНИЕ РАБОТ ПО ДЕКАБРЬ 1941 г.

НЕОТЛОЖНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. В главе II были изложены общие проблемы, связанные с получением цепной реакции и применением ее для военных нужд. В начале лета 1940 года наибольшую важность приобрели следующие вопросы:

(1) Возможно ли найти такие условия, при которых происходила бы цепная реакция?

(2) Можно ли добиться выделения изотопа U-235 в промышленном масштабе?

(3) Можно ли получить замедлитель и другие материалы достаточной чистоты и в нужном количестве?

Эти три вопроса, как видно из дальнейшего, предопределили ход работ за последующие восемнадцать месяцев, хотя и было много других второстепенных задач.

ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

ПРОГРАММА, ПРЕДЛОЖЕННАЯ 15 ИЮНЯ 1940 г.

4.2. В июне 1940 г. почти вся работа по вопросам цепной реакции была сосредоточена в Колумбии под общим руководством Пеграма и при ближайшем участии Ферми и Сциларда. Было установлено, что самыми благоприятными условиями для цепной реакции являются, вероятно, те, в которых деление происходит в неоднородной смеси графита и урана под действием тепловых нейтронов. Весной 1940 года Ферми, Сцилард и Г. Л. Андерсон повысили точность измерения поперечного сечения захвата нейтронов углеродом, резонансного поглощения нейтронов (промежу-

точных скоростей) изотопом U-238 и более детально изучили замедление нейтронов в углероде.

4.3. Пеграм, в записке Бригсу от 14 августа 1940 года писал: «Не очень легко измерять эти величины с большой точностью, не применяя больших количеств веществ. Результаты этих опытов весною 1940 года свидетельствовали о том, что возможность цепной реакции с достоверностью не доказана, хотя еще меньше можно считать ее полностью опровергнутой. В целом полученные указания были более благоприятны, чем выводы, сделанные из предыдущих результатов.

4.4. На собрании 15 июня (см. главу III) были обсуждены эти результаты и было рекомендовано, чтобы: (A) были проведены дальнейшие измерения ядерных постоянных и (B) были произведены опыты над решетками из урана и углерода, содержащими уран в количествах $1/5$ — $1/4$ вычисленных критических количеств.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ДОСТИГНУТЫЕ К 15 ФЕВРАЛЯ 1941 г.

4.5. Доклад Пеграма от 15 февраля 1941 г. показывает, что большая часть работ, выполненных к этому времени, относилась к пункту (A), тогда как работы по пункту (B) — так называемому промежуточному эксперименту — задерживались из-за недостатка материалов.

4.6. Перефразируя доклад Пеграма, можно представить главные результаты в следующем виде:

(а) *Замедление нейтронов в графите* было исследовано путем изучения интенсивности активации различных детекторов (родий, индий, иод), расположенных различным образом внутри прямоугольной графитовой колонны, имеющей размеры 3 × 3 × 8 футов, когда в нее помещался источник нейтронов. Подбирая соответствующие кадмиевые экраны, можно было исследовать действия резонансных *) и тепловых нейтронов в отдельности **).

*) См. сноску на стр. 70.

**) Присутствие нейтронов можно обнаружить при помощи ионизационных камер или счетчиков или посредством искусственной радиоактивности, индуцированной в тонких металлических листочках (см. Приложение 1). Чувствительность каждого из этих детекторов зависит от их природы и от скорости нейтронов (например, нейтроны с энергией около 1,5 вольта особенно эффективны в активации индия). Кроме того, некоторые

Математический анализ экспериментальных данных, основанный на теории диффузии, позволил предсказать результаты, ожидаемые в других расположениях. Эти результаты в сочетании с теоретическим изучением диффузии тепловых нейтронов послужили основой для расчета числа тепловых и резонансных нейтронов, обнаруживаемых в какой-нибудь точке в массе графита заданной формы, если источник нейтронов помещается в определенном положении внутри графита или вблизи него.

(b) *Число нейтронов, испускаемых при делении.* Опыты по замедлению нейтронов показали, что практически почти все нейтроны, обладающие большой энергией (быстрые), как, например, нейтроны, получающиеся при делении, снижают свою энергию до тепловой, проходя через слой графита толщиною в 40 *см* или более. Уран, помещенный в область образования тепловых нейтронов, поглощает их и — поскольку происходит деление — сам испускает быстрые нейтроны, легко отличимые от тепловых нейтронов. Производя ряд измерений, в присутствии урана и без него, с помощью разного рода детекторов и поглотителей можно получить значение константы η — числа нейтронов, испускаемых на один тепловой нейтрон, поглощенный ураном. Эта величина не есть число испускаемых нейтронов, приходящихся *на деление*, она несколько меньше этого числа, так как не каждое поглощение вызывает деление урана.

(c) *Теория решетки.* Производились обширные вычисления ожидаемого числа нейтронов, вылетающих за пределы решеток различных конструкций и размеров. Эти вычисления служили основой для так называемого промежуточного эксперимента, упомянутого выше в пункте (B).

НАЧАЛО ВЫПОЛНЕНИЯ НОВЫХ ПРОГРАММ

4.7. Интерес, проявленный отдельными учеными институтов в Принстоне, Чикаго и Калифорнии к проблеме цепной реакции,

---

вещества обладают весьма большими поперечными сечениями поглощения для нейтронов в определенных интервалах скоростей (например, кадмий — для тепловых нейтронов). Таким образом, измерения с различными детекторами и с разными поглотителями или без них дают некоторое указание как о количестве присутствующих нейтронов, так и о распределении их энергии. Однако, методы таких измерений довольно несовершенны.

привел к постановке ряда исследований в этих институтах. С тех пор работа этих групп согласовывалась с работой в Колумбии, образуя части единой большой программы.

РАБОТА ПО РЕЗОНАНСНОМУ ПОГЛОЩЕНИЮ *)

4.8. В главе II утверждалось, что решетчатая конструкция с правильным распределением блоков урана в замедлителе представляет известные преимущества. Именно над этой системой и работала колумбийская группа. Как это часто бывает, основная идея весьма проста. Если уран и замедлитель представляют однородную смесь, то нейтроны, теряя в среднем энергию небольшими порциями между прохождениями сквозь уран в процессе уменьшения скоростей до тепловых, будут иметь большую вероятность столкновений с атомами урана с заданной скоростью, например, со скоростью, соответствующей резонансному поглощению. Однако, если уран расположен в замедлителе блоками, с большими промежутками между ними, то энергия, теряемая нейтронами при переходе от одного блока урана к другому через замедлитель, будет велика, и вероятность того, что нейтроны достигнут блока урана с энергией, как раз равной энергии резонансного поглощения, будет относительно мала. Таким образом, вероятность поглощения нейтронов ураном-238 с образованием урана-239, в сравнении с вероятностью поглощения тепловых нейтронов, приводящего к делению, может быть достаточно уменьшена, для того, чтобы цепная реакция могла развиться. Если бы были известны точные значения поперечных сечений каждого изотопа урана для каждого типа поглощения и для любых интервалов скоростей нейтронов, и если бы имелись аналогичные сведения относительно замедлителя, то можно было бы рассчитать «оптимальную решетку», т. е. наиболее благоприятные размеры и форму блоков урана и расстояния в замедлителе. Так как подобные данные были из-

*) Термин «резонансное поглощение» применяется для описания весьма сильного поглощения нейтронов ураном-238, когда энергии нейтронов занимают определенные интервалы в пределах от 0 до 1000 электрон-вольт. Резонансное поглощение доказывает существование ядерных энергетических уровней при соответствующих значениях энергий. В некоторых случаях этот термин применяется ко всей энергетической области в окрестности таких уровней.

вестны лишь частично, необходим был непосредственный экспериментальный подход к проблеме. Поэтому было предложено измерять поглощение нейтронов ураном в условиях, подобных тем, которых можно ожидать в действующем котле с графитом в качестве замедлителя.

4.9. Эксперименты такого рода были начаты в Колумбии и продолжены в Принстоне в феврале 1941 г. Опыты состояли в изучении поглощения нейтронов в интервале энергий от нескольких тысяч электрон-вольт до долей электрон-вольта (тепловые энергии), причем поглощение имело место в различных слоях сфер из урана или окиси урана, уложенных в графите.

4.10. В этих экспериментах нейтроны получались при бомбардировке бериллиевой мишени протонами, ускоренными в циклотроне (выход нейтронов был эквивалентен радие-бериллиевому источнику с интенсивностью около 3500 кюри). Нейтроны, полученные таким образом, обладали широким непрерывным распределением скоростей. От этого источника они проходили в большой графитовый блок. Помещая различные сферы из урана или окиси урана внутри графита в различных положениях на все возрастающих расстояниях от источника, можно было изучать поглощение нейтронов, средние скорости которых уменьшались до тепловых. Было найдено, что общее поглощение нейтронов такими сферами могло быть выражено через «поверхностный» эффект и «объемный» эффект.

4.11. Эксперименты, требующие применения сфер разных размеров, различных плотностей и в различных расположениях, продолжались до весны 1942 года, когда большинство членов группы было переведено в Чикаго. Аналогичные эксперименты, проделанные позднее в университете Индианы А. Ч. Г. Митчелом и его сотрудниками, подтвердили и в некоторых случаях исправили данные, полученные в Принстоне, но летом 1941 года принстонские данные были достаточно точны для использования в планировании опытов с полузаводскими котлами, а впоследствии с промышленными котлами.

4.12. Опыты по резонансному поглощению в Принстоне были выполнены Р. Р. Вильсоном, Э. К. Кройтцем и их сотрудниками, под общим руководством Г. Д. Смита; им постоянно помогали Вигнер и Уилер, и они часто совещались с колумбийской группой.

ПЕРВЫЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

4.13. Приблизительно в июле 1941 г. в Колумбии впервые был произведен в большом масштабе опыт с решеткой из урановых блоков в графите. Был сложен графитовый куб с ребром в 8 футов, содержавший около 7 тонн окиси урана в железных коробках, расположенных в графите с равными промежутками. Предварительная серия измерений на этой конструкции была выполнена в августе 1941 г. Аналогичные конструкции несколько более значительных размеров были установлены и исследованы в течение сентября и октября, и впервые был разработан и применен так называемый экспоненциальный метод определения коэффициента размножения (описанный ниже). Эта работа была выполнена Ферми и его помощниками Г. Л. Андерсоном, Б. Фельдом, Дж. Вейлем и В. Г. Цинном.

4.14. Опыты над коэффициентом размножения похожи на описанные выше опыты по определению η — числа нейтронов, испускаемых на один поглощенный тепловой нейтрон. Радие-бериллиевый источник нейтронов помещается у основания решетки, и измеряется число нейтронов в различных точках решетки. Затем эти числа сравниваются с соответствующими числами, полученными в отсутствии урана в массе графита. Очевидно, поглощение нейтронов ураном-238 с превращением его в уран-239 приводит к уменьшению числа нейтронов, в то время как деление урана увеличивает это число. Возникает вопрос: что преобладает? или, более точно, преобладает ли освобождение нейтронов в процессах деления над всеми процессами поглощения нейтронов? Истолкование экспериментальных данных по этому решающему вопросу сопровождалось введением многих поправок, вычислениями и приближениями, но в конце концов все сводилось к единственному числу — коэффициенту размножения k.

КОЭФФИЦИЕНТ РАЗМНОЖЕНИЯ

4.15. Успех или неудача решения всей проблемы урана зависели всецело от коэффициента размножения k, называемого иногда коэффициентом воспроизведения. Если k удастся сделать более единицы в практически действующей системе, проект окажется успешным; если же нет, то цепная реакция окажется не более, как фантазией. Это ясно из следующего рассуждения, примени-

мого к любой системе, содержащей материал, подверженный делению. Предположим, что в данный момент в системе имеется определенное число свободных нейтронов. Некоторые из этих нейтронов сами вызовут деление и будут таким образом непосредственно производить новые нейтроны. Коэффициент размножения k есть отношение числа этих новых нейтронов к числу первоначально имевшихся свободных нейтронов. Пусть в котле, содержащем уран, углерод, примеси, коробки и т. д., делением произведены 100 нейтронов; некоторые из них вылетят из котла, некоторые будут поглощены ураном и не вызовут деления, некоторые будут поглощены углеродом, материалом коробки или примесями и лишь некоторые из этих 100 нейтронов вызовут деление, производя тем самым новые нейтроны (см. рис. 2 на стр. 36). Если делений достаточно много и каждое из них в отдельности достаточно эффективно, то будет произведено более 100 новых нейтронов, и система обеспечит развитие цепной реакции. Если число новых нейтронов 105, то $k = 1{,}05$. Но если число новых нейтронов на 100 начальных равно 99, то $k = 0{,}99$, и цепная реакция невозможна.

4.16. Мы отдавали себе отчет в том, что описанный выше промежуточный или «экспоненциальный» эксперимент имел слишком малый масштаб для получения цепной реакции. Поэтому, представляет весьма большой интерес знать, будет ли происходить цепная реакция в котле более крупных размеров, но с решеткой той же конструкции. Это можно было определить, рассчитав, какое значение получит k для неограниченно большой решетки того же типа. Задача состояла в том, чтобы вычислить, каково было бы значение k, если бы сквозь стенки котла не происходило никакой диффузии нейтронов. Фактически теперь установлено, что если система, в которой происходит цепная реакция, в достаточной мере превосходит критические размеры — например, в два или три раза, — и окружена так называемым рефлектором, то эффективное значение k очень мало отличается от значения k для бесконечных размеров, при условии, что k близко к 1,00. Поэтому, способность разных смесей урана с замедлителем давать цепную реакцию обычно характеризуют значением k_∞ — коэффициента размножения, полученным в предположении котла бесконечно больших размеров.

4.17. Значение k_∞, согласно отчету Ферми на заседании Секции урана осенью 1941 года, было около 0,87. Такое значение основывалось на результатах, полученных из второго промежуточного эксперимента в Колумбии. Все считали, что коэффициент размножения можно увеличить путем увеличения химической чистоты материалов, различных усовершенствований решетки и т. д., но никто не мог утверждать с достоверностью, что k можно будет сделать бо̀льшим единицы.

ОПЫТЫ С БЕРИЛЛИЕМ

4.18. Примерно в то же время, когда были начаты работы по изучению резонансного поглощения в Принстоне, С. К. Алисон, по предложению А. Х. Комптона, начал в Чикаго работу по договору, действовавшему в период с 1 января по 1 августа 1941 г. Работа преследовала две цели: (а) изучение увеличения возникновения нейтронов в том случае, когда котел окружен бериллиевой оболочкой или «рефлектором», и (b) исследование поперечных сечений взаимодействия нейтронов с бериллием. 18 июля 1941 г. был заключен новый договор сроком до 30 июня 1942 г. Здесь была поставлена несколько более широкая цель — общее исследование систем уран—бериллий—углерод. Отпущенные ассигнования были скромны: 9500 долларов на первый контракт и 30 000 долларов — на второй.

4.19. Как было уже указано в главе II, бериллий обладает желательными свойствами в качестве замедлителя, благодаря своему малому атомному весу и небольшому поперечному сечению поглощения нейтронов; кроме того, возможно увеличение числа нейтронов в бериллии в результате реакции (n, 2n). Точное значение поперечного сечения было неизвестно; кроме того, далеко не было уверенности в том, что можно будет получить сколько-нибудь большие количества чистого бериллия. Проблема, стоявшая перед Алисоном, была в основном аналогична колумбийской проблеме, только вместо графита применялся бериллий. Из-за недостатка бериллия было предложено, чтобы он применялся вместе с графитом или каким-либо другим замедлителем, по возможности в качестве рефлектора.

4.20. В чикагских экспериментах нейтроны, получавшиеся с помощью циклотрона, направлялись в котел из графита и берил-

лия. Алисон выполнил ряд измерений по замедлению нейтронов и поглощению их графитом, что являлось ценным контролем аналогичных измерений в Колумбии. Ему, наконец, удалось получить бериллий в количестве, достаточном для выполнения важных измерений, которые показали, что бериллий может служить замедлителем, сравнимым с графитом. Однако, в действительности бериллий совсем не применялся в широких масштабах, ввиду больших трудностей получения его в больших количествах и в нужном виде.

4.21. Чикагский проект, описанный выше, стал частью проекта Металлургической лаборатории, основанной в Чикагском университете в начале 1942 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ РАБОТА

4.22. Как промежуточные эксперименты в Колумбии, так и продолжавшиеся работы по резонансному поглощению в Принстоне требовали тонкого научного истолкования. Ферми создал теорию «экспоненциальных» опытов, а Вигнер — теорию резонансного поглощения; оба ученые постоянно совещались между собой и участвовали в решении многих проблем. Уилер (Принстон), Брейт (Висконсин) и Экарт (Чикаго) также сделали вклад в общую теорию котла и смежных проблем. Можно сказать, что общая теория цепной реакции для медленных нейтронов к концу 1941 г. была вполне ясна. Оставались неопределенными лишь числовые константы и технологические возможности.

4.23. Была также значительно развита теория реакции на быстрых нейтронах в уране-235. В частности, были произведены новые оценки критических размеров, и было предсказано, что, возможно, 10 процентов полной энергии освободится в виде взрыва.

Исходя из этой оценки, один килограмм U-235 должен быть эквивалентен 2000 тонн тринитротолуола. Ниже дается обзор результатов по докладу Национальной Академии Наук. Вспомним, что при этом возникали два вопроса: (1) какая часть энергии деления ядра освободится, прежде чем остановится реакция? (2) насколько разрушителен будет такой в высшей степени концентрированный взрыв?

РАБОТА НАД ПЛУТОНИЕМ

4.24. В главе I упоминалось о предположении (1), что элемент 94, позже названный плутонием, образуется в результате двух последовательных β-распадов U-239, происходящих в результате поглощения нейтронов ураном U-238, и (2) что плутоний, вероятно, испускает α-частицы, обладает длительным периодом полураспада и претерпевает деление при бомбардировке нейтронами. Летом 1940 г. группе ядерной физики университета в Беркли (Калифорния) было предложено воспользоваться нейтронами, даваемыми мощным циклотроном, для того, чтобы получить плутоний, отделить его от урана и исследовать его способность к делению. С этой целью Э. Сегре, Дж. Т. Сиборг, Дж. В. Кеннеди и А. К. Валь (Беркли) до 1941 года произвели различные эксперименты, о которых Э. О. Лоуренс сообщил Комитету Национальной Академии Наук (см. ниже) в мае 1941 г.; они были также изложены в записке, включенной во второй доклад Комитета от 11 июля 1941 г. Как будет видно ниже, эта записка содержит одну важную мысль, которая специально не подчеркивалась другими (параграф 1.58), а именно мысль о массовом производстве плутония для применения в атомной бомбе.

4.25. Приводим из записки Лоуренса следующую выдержку:

«Со времени опубликования первого доклада Комитета Академии Наук по делению ядра была открыта новая огромной важности возможность использования цепной реакции с неразделенными изотопами урана. Эксперименты в лаборатории излучения Калифорнийского университета показали: (a) что элемент 94 образуется в результате захвата нейтрона ураном-238, сопровождаемого двумя последовательными β-превращениями и, кроме того, (b) что этот трансурановый элемент претерпевает деление под действием медленных нейтронов и поэтому ведет себя, должно быть, подобно U-235.

Отсюда следует, что если осуществлена цепная реакция с неразделенными изотопами, то можно вести ее достаточно интенсивно и пользоваться ею специально для производства элемента 94 в значительных количествах. Это вещество могло бы быть выделено средствами обычной химии и вероятно, что оно эквивалентно урану-235 в осуществлении цепной реакции.

Если это так, то открываются три важнейшие возможности:

1. Уран-238 был бы пригоден для производства энергии, что увеличило бы общую атомную энергию, получаемую из данного количества урана, примерно в сто раз.

2. Учитывая применение элемента 94, можно предвидеть изготовление небольших установок цепной реакции для энергетических целей, весящих, быть может, сто фунтов вместо ста тонн, которые, вероятно, потребовались бы для установок с применением естественного урана.

3. Если бы элемент 94 имелся в больших количествах, вполне вероятно, что могла бы быть осуществлена цепная реакция с помощью быстрых нейтронов. В такой реакции энергия освобождалась бы со скоростью взрыва, и соответствующая система могла бы быть охарактеризована термином «сверхбомба».

РАДИОАКТИВНЫЕ ОТРАВЛЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА

4.26. Как указывалось выше, осколки, образовавшиеся в результате деления, в большинстве случаев представляют собою неустойчивые ядра, т. е. искусственно радиоактивные вещества. Общеизвестно, что излучения радиоактивных веществ производят очень вредное действие, подобное действию рентгеновских лучей.

4.27. В котле, в котором протекает цепная реакция, образуются радиоактивные продукты деления (на практике они принесли больше всего затруднений). Так как химически они отличаются от урана, их можно было бы выделить и применять как ядовитые газы особо сильного действия. Эта мысль упоминалась в докладе Академии Наук (см. параграф 4.48) и была развита в докладе, написанном 10 декабря 1941 г. Э. Вигнером и Г. Д. Смитом, которые пришли к выводу, что продуктов деления, полученных за время однодневной работы котла цепной реакции мощностью в 100 000 kW, было бы достаточно для того, чтобы большую площадь превратить в пустыню.

4.28. Вигнер и Смит не рекомендовали применения радиоактивных отравляющих веществ, не рекомендовали этого и ответственные представители властей, но серьезному рассмотрению подвергся вопрос о возможности неожиданного применения немцами радиоактивных отравляющих веществ, и были намечены соответствующие меры защиты.

РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ

РАЗДЕЛЕНИЕ В НЕБОЛЬШИХ МАСШТАБАХ ПРИ ПОМОЩИ МАСС-СПЕКТРОГРАФА

4.29. В главе I было указано, что в результате частичного разделения небольших количеств изотопов урана в масс-спектрографе А. О. Нира и изучения ядерных свойств образцов было установлено, что деление урана под действием тепловых нейтронов следует приписать изотопу U-235. Дополнительно небольшие количества были доставлены Ниром летом 1941 г. и изучены Н. П. Гейденбургом и другими в руководимой М. А. Тьювом лаборатории отделения земного магнетизма Института Карнеги в Вашингтоне. Но результаты этих опытов были лишь предварительными и было, очевидно, желательно дальнейшее изучение более крупных и более тщательно разделенных образцов.

4.30. Потребность в больших количествах U-235 побудила Э. О. Лоуренса в Беркли работать над электромагнитным разделением. Он достиг замечательных успехов и 6 декабря 1941 г. сообщил, что в состоянии в течение одного часа выделить один микрограмм U-235, в значительной степени очищенный от U-238.

4.31. Еще до этого, на заседании Комитета по урану Смит (Принстон) поднял вопрос о возможном промышленном разделении изотопов электромагнитным способом; но ему возразили, что этот метод был исследован и признан неосуществимым. Несмотря на это, Смит и Лоуренс, случайно встретившись в октябре 1941 г., обсудили этот вопрос и пришли к выводу, что решение его все же возможно. Смит снова поднял этот вопрос 6 декабря, и на следующем заседании (18 декабря 1941 г.) имела место общая дискуссия по вопросу о промышленном применении электромагнитных способов в связи с упомянутым сообщением Лоуренса о достигнутых им успехах. Результаты этой дискуссии изложены в главе XI.

МЕТОД ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ И МЕТОД ГАЗОВОЙ ДИФФУЗИИ

4.32. Хотя мы выяснили, что отделение U-235 от U-238 было основным для успеха всего Проекта, мало было сказано о работах в этой области. Эти работы велись с лета 1940 г. под общим руководством Г. К. Юри в Колумбии. Так как реорганизация, про-

исшедшая в декабре 1941 года, мало коснулась этой части работ по урану, то детальное описание работ отнесено к главам IX и X. Здесь дается лишь краткий обзор.

4.33. После тщательного рассмотрения и значительного числа опытов, проведенных разными методами, было установлено, что самыми многообещающими методами выделения больших количеств U-235 из U-238 были методы центрифугирования и диффузии через пористые перегородки. В центрифуге на оба изотопа действуют несколько различные силы, благодаря разнице в их массах. По этой же причине скорости диффузии обоих изотопов сквозь пористые перегородки также различны. Оба метода требовали, чтобы уран находился в газообразном состоянии, что являлось серьезным ограничением, так как единственным подходящим газообразным соединением урана, известным в то время, был шестифтористый уран. В каждом методе величина ожидаемого обогащения была для одной «ступени» очень мала; это требовало большого числа ступеней для получения высокой степени обогащения.

4.34. К концу 1941 г. применимость каждого из указанных методов была доказана на опыте; обогащение U-235 в лабораторных масштабах было осуществлено в одноступенчатых установках примерно до такой степени, как предсказывает теория. К. Коген (Колумбийский университет) и др. разработали теорию одной ступени и серии, или «каскада», ступеней. Таким образом удалось оценить, что для диффузионной системы потребовалось бы около 5000 ступеней; общая площадь перегородок для разделительного завода, выделяющего 1 *кг* U-235 в сутки, составляла бы много акров. Соответствующие этим расчетам издержки исчислялись десятками миллионов долларов. Для центрифугирования число ступеней было бы меньше, но было оценено, что для той же производительности потребовалось бы 22 000 сверхбыстроходных центрифуг с индивидуальными приводами, при длине каждой центрифуги около трех футов.

4.35. Разумеется, издержки производства не могли быть точно рассчитаны, так как технологические проблемы почти не были решены, но эти сметы, касающиеся стоимости установки и ее размеров, нужны были для того, чтобы подчеркнуть масштабы всего предприятия.

ТЕРМОДИФФУЗИЯ В ЖИДКОСТЯХ

4.36. В сентябре 1940 г. П. Г. Абельсон представил на рассмотрение Бригсу записку на 17 страницах, в которой предлагалось разделение изотопов урана посредством термодиффузии в жидком шестифтористом уране. Проблемами урана интересовался также и Р. Гэн — из Научно-исследовательской лаборатории военно-морского флота; он был назначен членом Комитета по урану, когда последний летом 1940 г. был реорганизован и передан НДРК (Исследовательский Комитет Национальной Обороны). В результате предложения Абельсона и заинтересованности Гэна, в Национальном Бюро Стандартов была начата работа по исследованию термодиффузии. Эта работа финансировалась Военно-морским министерством и в 1940 г. была передана Научно-исследовательской лаборатории военно-морского флота, где ее продолжали под руководством Абельсона.

4.37. Мы рассмотрим работы по термодиффузии в одной из дальнейших глав; здесь же упомянем лишь о том, что к концу 1941 года были уже получены существенные результаты и что в январе 1942 г. на одной разделительной колонне был получен коэффициент разделения, оказавшийся сравнимым (или выше) с коэффициентом разделения, полученным к тому времени в предварительных испытаниях метода диффузии и метода центрифугирования.

ПРОИЗВОДСТВО ТЯЖЕЛОЙ ВОДЫ

4.38. В главе II было указано, что можно было ожидать, что дейтерий окажется хорошим замедлителем, благодаря своему свойству слабо поглощать и сильно замедлять нейтроны; но из-за недостатка дейтерия применение его было затруднено. Экспериментальные результаты, полученные в Беркли и показывавшие, что поперечное сечение поглощения нейтронов дейтерием фактически почти равно нулю, повысили интерес к дейтерию. Так как кислород обладает очень низким коэффициентом поглощения нейтронов, то считали, что дейтерий следует применять в комбинации с кислородом, т. е. в очень подходящем для этого веществе — тяжелой воде. Работы в Колумбии над возможными методами промышленного производства тяжелой воды были начаты в феврале 1941 г. под руководством Г. К. Юри (по контракту с НДРК). В

начале 1941 г. Р. Г. Фаулер из Англии сообщил, что англичане интересуются дейтерием (тяжелой водой), как замедлителем, и, по их убеждению, цепная реакция может происходить в сравнительно малых установках с ураном и тяжелой водой.

4.39. Юри и А. фон Гроссе уже изучали вопрос о выделении тяжелой воды методом каталитической реакции обмена между газообразным водородом и жидкой водой. Этот процесс основан на том, что когда между газообразным водородом и водою устанавливается изотопное равновесие, концентрация дейтерия в воде в три-четыре раза больше, чем в газообразном водороде. В течение 1941 года реакция обмена между водой и водородом исследовалась в Колумбии и в химической лаборатории Фрика в Принстоне, и велись большие работы по созданию методов промышленного производства веществ, которые смогли бы играть роль катализаторов в этой реакции.

4.40. Дальнейшее развитие упомянутых работ и других методов производства тяжелой воды рассмотрено в главе IX. Подобно другим работам по разделению изотопов, проводившимся в Колумбии, реорганизация, имевшая место в декабре 1941 г., мало затронула эти работы. Они упомянуты здесь лишь для того, чтобы показать, что в 1941 г. исследовались уже все главные пути, ведущие к решению проблемы.

ПРОИЗВОДСТВО И АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ

4.41. К концу 1941 года успехи в производстве материалов для установки цепной реакции были не очень велики. Национальное Бюро Стандартов и колумбийская группа находились в контакте с фирмой Metal Hydrides Co. в Беверли (штат Массачузетс). Эта фирма производила небольшие количества урана в порошке, но попытки увеличить продукцию и выплавить из порошка сплошные слитки оказались мало успешными.

4.42. Аналогично, не удалось получить в больших количествах графит высокой чистоты. Графит, применявшийся в Колумбийском университете, поставлялся фирмой U. S Graphite Company в Сэджиноу (штат Мичиган). Он обладал высокой степенью чистоты для промышленного продукта, но в нем содержалась нежелательная примесь бора в количестве 1 : 500 000.

4.43. В значительной мере благодаря заинтересованности Алисона, была исследована возможность увеличения производства бериллия, причем было установлено, что оно было сложно и дорого, но, вероятно, возможно.

4.44. Хотя в области производства достижения были невелики, большие успехи были достигнуты в области анализа. На протяжении всей истории осуществления Проекта разработка достаточно точных методов химического анализа была проблемой первостепенного значения, хотя иногда она заслонялась внешне более эффектными проблемами. В течение этого периода главная ответственность за химические анализы лежала на К. Дж. Роддене и сотрудниках лаборатории Национального Бюро Стандартов; в работе принимал также участие Г. Т. Бинс из Колумбийского университета. К 1942 году несколько других групп приступили к аналитическим работам и с тех пор не прекращали своей деятельности.

4.45. Подводя итоги, можно сказать, что к концу 1941 года не было данных утверждать, что получение материалов в достаточных количествах и достаточной чистоты невозможно, но проблемы были еще далеки от решения.

ОБМЕН ИНФОРМАЦИЕЙ С АНГЛИЧАНАМИ

4.46. До осени 1941 г. происходил некоторый обмен информацией с англичанами и обсуждение некоторых вопросов с английскими научными представителями, бывшими здесь по другим делам. В сентябре 1941 г. было решено, что Пеграм и Юри должны поехать в Англию и получить сведения из первых рук. Они возвратились в начале декабря 1941 г.

4.47. Вообще, в Англии работа велась в основном по тем же направлениям, что и в США. Что касается проблемы цепной реакции, то англичане концентрировали внимание на тяжелой воде, а не графите, в качестве замедлителя. По разделению изотопов они проделали большую работу над вопросами диффузии, включая общую теорию каскадов. Главное значение этого посещения и других обменов мнениями в течение лета 1941 года заключалось не в точных научных данных, а в общем впечатлении о научных работах. Англичане, в частности Дж. Чэдвик, были

убеждены, что можно осуществить цепную реакцию с U-235. Они знали, что в Норвегии производится каждые сутки несколько килограммов тяжелой воды и что германское правительство заказало большие количества парафина с тяжелым водородом; применение этого материала для чего-либо иного, кроме исследований урана, нельзя было себе представить. Англичане опасались, что если немцам удастся получить атомную бомбу раньше союзников, война может закончиться в несколько недель. Чувство срочности и важности задачи, которое осталось у Юри и Пеграма, имело большое значение для дальнейшей работы.

ДОКЛАД КОМИТЕТА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК

4.48. В главе III упоминалось об учреждении Комитета Академии Наук. В первом докладе Комитета, в мае 1940 года, содержались такие вопросы: (a) радиоактивные отравляющие вещества, (b) атомная энергия, (c) атомные бомбы; но особое значение придавалось атомной энергии. Второй доклад подчеркнул важность новых результатов с плутонием, но не касался специально вопроса о возможном военном применении процесса деления ядра. Оба эти доклада побуждали значительно ускорить осуществление Проекта.

4.49. Третий доклад (6 ноября 1941 г.) был специально посвящен вопросу о «возможностях взрывной реакции деления урана-235». Если в первых двух докладах Академии Наук не указывалось, что уран может сыграть решающую роль в современной войне, то эта возможность была подчеркнута в третьем докладе. Лучше всего будет привести выдержки из этого доклада.

«Со времени нашего последнего доклада успехи, достигнутые в области разделения изотопов, с настоятельной необходимостью выдвинули следующие вопросы: (1) вероятность успеха попытки создания атомной бомбы, (2) разрушительное действие, которое можно ожидать от такой бомбы, (3) время, необходимое для того, чтобы закончить разработку атомной бомбы и наладить производство, и (4) предварительная оценка денежных затрат.

1. *Условия создания атомной бомбы. Атомная бомба исключительной разрушительной силы явится результатом сближения достаточных масс элемента U-235, происходящего очень быстро.* Это представляется столь же верным, как и всякое предсказание,

основанное на теории и эксперименте, но не испытанное практически. Наши вычисления показывают, далее, что требуемые массы могут быть сближены достаточно быстро, чтобы реакция стала действенной...

2. *Разрушительное действие атомных бомб.* (a) *Масса бомбы. Масса урана-235, необходимая для получения взрывного деления при подходящих условиях, едва ли может быть менее 2 кг и более 100 кг.* Эти широкие пределы вызваны, главным образом, неопределенностью значения поперечного сечения захвата U-235 для быстрых нейтронов, получаемого из опытов,... (b) *Энергия, освобождаемая при взрывном делении.* Вычисления для случая масс, надлежащим образом распределенных в начальный момент, показывают, что от 1 до 5 процентов энергии деления урана должны освободиться при взрыве, обусловленном делением. Это равно энергии от $2 \cdot 10^8$ до $10 \cdot 10^8$ *ккал* на килограмм урана-235. Таким образом, *освобождающаяся при взрыве энергия на килограмм урана эквивалентна энергии взрыва около 300 тонн тринитротолуола.*

3. *Время, необходимое для разработки и получения необходимого количества U-235.* (a) *Необходимое количество урана.* Так как разрушительная сила современных бомб является в настоящее время важным фактором военных действий, очевидно, что если разрушительную силу бомб повысить в 10 000 раз, то такие бомбы приобретут решающее значение.

Тем не менее, требуемое количество урана будет велико. Если признать правильным расчёт, согласно которому для уничтожения военных и промышленных объектов Германии понадобилось бы 500 000 *т* бомб из тринитротолуола, то *такое же разрушительное действие произвел бы уран-235 в количестве от 1 до 10 тонн.*

(b) *Выделение U-235. Разделение изотопов урана может быть выполнено в нужных количествах.* В настоящее время разрабатываются несколько методов, из которых по крайней мере два представляются вполне подходящими и приближаются к стадии практических испытаний. Это — метод центрифугирования и метод диффузии через пористые перегородки. Другие методы изучаются или нуждаются в исследовании; они могут оказаться в конечном счете лучшими, но пока далеки от технического применения.

(с) *Время, необходимое для производства атомных бомб.* В данный момент можно лишь весьма грубо оценить время, необходимое для разработки, технического освоения и производства атомных бомб. Однако, если сосредоточить все усилия на выполнении программы, то можно ожидать получения значительного количества атомных бомб через три-четыре года.

4. *Грубая оценка материальных затрат.* (Цифры, приведенные в докладе Академии под этим заголовком, являются лишь грубой оценкой, так как не было научных и технических данных. Они лишь показывали, что все предприятие обошлось бы колоссально дорого, но затраты были бы такого же порядка, как и другие военные расходы)».

4.50. Дальше в докладе говорится о ближайших нуждах и желательной реорганизации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ

4.51. В конце главы I мы подвели итог научным данным, относящимся к делению ядра, за период до июня 1940 г., а в гл. II сформулировали важнейшие проблемы за тот же период. В свете этих формулировок сделаем краткий перечень успехов, достигнутых за восемнадцать месяцев. Прогресс в техническом осуществлении Проекта был невелик. Цепная реакция осуществлена не была; заметного количества U-235 выделить из U-238 не удалось; были получены лишь ничтожные количества Pu-239; производство больших количеств металлического урана, тяжелой воды, бериллия и чистого графита в значительной мере находилось еще в стадии обсуждений. Но были также и успехи. Постоянные стали лучше известны; вычисления были проверены и расширены; предположения о существовании и о ядерных свойствах Pu-239 были подтверждены. До известной степени были изучены технические проблемы, эффективность производственных процессов, издержки производства и графики времени. И, что важнее всего, было показано, что критическая величина бомбы почти достоверно лежит в практически достижимых пределах. В общем, вероятность того, что каждая из проблем будет разрешена, стала значительно больше, чем в 1940 году. Быть может, важнее фактических изменений были изменения в сознании людей. Вигнер, Сцилард и

Ферми, возможно, были теперь не более убеждены в реальности атомной бомбы, чем в 1940 году, но с этой идеей освоились многие другие и оценили ее возможные последствия. Повидимому, как англичане, так и немцы считали, что стоит заниматься проблемой атомной бомбы. Кроме того, изменилась вся психология нации. Хотя нападение на Пирл Харбор еще не произошло, нависшая угроза войны ощущалась острее, чем прежде, и затраты сил и средств, которые казались огромными в 1940 году, рассматривались как необходимая предосторожность в декабре 1941 года. Поэтому неудивительно, что Буш и его сотрудники сознавали, что пришло время резко ускорить осуществление проекта по урану. Для этой цели была создана совершенно новая организация управления, которая описана в следующей главе.

ГЛАВА V

АДМИНИСТРАТИВНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В 1942-1945 гг.

5.1. В главе III был дан обзор организации работ по урану по декабрь 1941 г. Глава IV содержала историю развития научно-исследовательской работы до того же момента времени. В настоящей главе описаны реорганизация управления в декабре 1941 г. и различные изменения, имевшие место позднее.

РЕОРГАНИЗАЦИЯ УРАНОВОЙ СЕКЦИИ НДРК. ПЕРЕДАЧА В ООРД

5.2. Для дальнейшего планирования программы по урану или по атомной бомбе нужны были два важные решения. Эти решения были приняты Ванневаром Бушем, директором Управления Научно-Исследовательских работ (Office of Scientific Research and Development — OSRD) (которое включало НДРК), после совещания с различными учеными и официальными лицами (см. гл. III). Эти решения были таковы: во-первых, признать, что возможность создания атомных бомб для применения их в нынешней войне достаточно велика, чтобы оправдать огромные усилия для их разработки; во-вторых, констатировать, что Урановая Секция НДРК (известная, как Секция S-1, и состоящая из: председателя Л. Дж. Бригса, заместителя председателя Дж. Б. Пеграма, технического советника Г. Т. Венселя и членов — С. К. Алисона, Дж. У. Бимса, Г. Брейта, Э. У. Кондона, Р. Гэна, Г. Д. Смита и Г. К. Юри) организована не надлежащим образом для выполнения возложенных на нее задач.

5.3. На заседании Исследовательского Комитета Национальной Обороны (National Defense Research Committee — NDRC) 28 ноября 1941 г. Буш объяснил, почему он считает целесообразным выполнение проекта по урану передать другой организации. Члены НДРК согласились с этим предложением, и НДРК в даль-

нейшем не имел никакого отношения к проекту по урану, который некоторое время находился в непосредственном ведении Секции S-1 ОСРД, а позднее — в ведении Исполнительного Комитета S-1 ОСРД.

5.4. На заседании Секции S-1 ОСРД 6 декабря 1941 г. Дж. Б. Конант от имени Буша объявил всеобщую мобилизацию сил и новый состав группы. Сама Секция S-1 формально не была запрошена о ее мнении по поводу реорганизации, но несомненно, большая часть ее членов склонялась в пользу новых предложений. В реорганизованную Секцию S-1 входили: представитель В. Буша—Дж. Б. Конант, председатель—Л. Дж. Бригс, заместитель председателя — Дж. Б. Пеграм, ответственные за выполнение программы — А. Х. Комптон, Э. О. Лоуренс, Г. К. Юри, председатель отдельно организованного Бюро технического планирования—Э. В. Мерфри, консультант по технике Г. Т. Венсель, члены — С. К. Алисон, Дж. У. Бимс, Г. Брейт, Э. У. Кондон и Г. Д. Смит.

ОБРАЗОВАНИЕ БЮРО ТЕХНИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

5.5. В то время, когда была реорганизована Секция S-1, Буш учредил также Бюро технического планирования, в функции которого входили производственно-технические вопросы, доставка материалов и строительство опытных установок, а также сооружение установок промышленного масштаба. Это Бюро технического планирования состояло из Э. В. Мерфри (председатель), В. К. Льюиса, Л. У. Чэба, Дж. О. Кэрма-младшего и П. К. Кейта.

ФУНКЦИИ БЮРО ТЕХНИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И СЕКЦИИ S-1 ОСРД

5.6. Было решено, что контракты на научно-исследовательскую часть работы должны будут рекомендоваться Бушу не всей Секцией S-1, а Бригсом и Конантом после совещаний с соответствующими руководителями программ, и что рекомендации по техническим контрактам должны представляться Бушу Бюро технического планирования. (Контракты, составленные от имени старой Урановой Секции, были проведены через НДРК). Контракты на разработку процессов разделения методами диффузии и методом центрифугирования должны были представляться Бюро технического планирования, которое также отвечало за программу про-

изводства тяжелой воды. Буш установил, что Бюро технического планирования «должно отвечать за составление планов, на основе которых можно было бы приступить к выполнению важнейших работ немедленно».

5.7. Научные вопросы работы были отделены от вопросов технических и снабжения. Ответственным руководителям программы — Г. К. Юри, Э. О. Лоуренсу и А. Х. Комптону — было поручено руководить научными вопросами. Вначале предполагалось, что Юри будет отвечать за разделение изотопов методами диффузии и методом центрифугирования и за исследовательскую работу по производству тяжелой воды. Лоуренс должен был отвечать за первоначальное получение небольших препаратов элементов, могущих испытывать деление, за массовое производство методами электромагнитного разделения и за некоторые экспериментальные работы, относящиеся к свойствам ядра плутония. Комптон должен был отвечать за изучение цепной реакции, имеющее фундаментальное значение, за измерение ядерных констант и особенно за изучение цепной реакции взрыва. Позднее ему было поручено также исследование возможности получения в нужных количествах плутония методом управляемой цепной реакции. Однако, предполагалось, что это разделение обязанностей должно было быть уточнено на следующих совещаниях. (Письменные отчеты этого периода не всегда дают правильное представление о замыслах и намерениях работников, участвовавших в осуществлении Проекта. В связи с требованиями секретности, упоминания о плутонии и даже о самой атомной бомбе часто полностью изымались из отчетов).

5.8. В результате реорганизации руководство работами было сосредоточено в руках небольшой группы, в которую входили: Буш, Конант, Бригс, Комптон, Юри, Лоуренс и Мерфри. Теоретически, Комптон, Лоуренс, Юри и Мерфри отвечали только за свои разделы программы. Каждый из них встречался с Конантом и Бригсом, или иногда с Бушем, чтобы обсудить свои частные вопросы или даже вопросы всей программы.

ЗАСЕДАНИЕ ВЫСШЕЙ ПОЛИТИЧЕСКОЙ ГРУППЫ — УТВЕРЖДЕНИЕ РЕОРГАНИЗАЦИИ

5.9. Заседание Высшей Политической Группы, в составе вице-президента Генри А. Уоллеса, военного министра Генри Л. Стим-

сона и д-ра В. Буша, состоялось 16 декабря 1941 г. Другие члены группы, генерал Джордж К. Маршалл и д-р Дж. Б. Конант, отсутствовали; в заседании принимал участие Г. Л. Смит из Бюджетного Бюро. Буш доложил о происходившей реорганизации, и планы ее были одобрены. В записке Конанту об этом заседании Буш писал: «Для всей группы было ясно, что ОСРД должно максимально ускорить решение основных физических проблем и техническое планирование, особенно строительство опытных установок».

Буш оценил стоимость этого вида работ в 4—5 млн. долларов и заявил, что, когда начнется крупное строительство, Армия все дело возьмет в свои руки, — вероятно, после постройки опытных установок. Он предложил назначить технически подготовленного офицера армии для ознакомления со всеми вопросами, связанными с ураном. На этом заседании было выяснено, что международные связи, имеющие отношение к проблеме, находятся в руках президента, причем Буш отвечает лишь за техническую сторону дела.

ЗАСЕДАНИЕ СЕКЦИИ S-1 ОСРД 18 ДЕКАБРЯ 1941 г.

5.10. 18 декабря 1941 г. состоялось заседание реорганизованной Секции S-1. На нем присутствовал Конант, изложивший основы нового курса, который требовал максимальных всеобщих усилий. Он подчеркнул, что такие усилия оправдываются лишь военным значением атомных бомб, и что все внимание должно быть сосредоточено на разработке атомной бомбы. Все заседание прошло в атмосфере энтузиазма и сознания необходимости скорейшего выполнения всех задач. Подверглось обсуждению несколько методов электромагнитного разделения, и было рекомендовано заключение ряда новых контрактов.

ЗАСЕДАНИЕ СЕКЦИИ S-1 ОСРД 16 ЯНВАРЯ 1942 г.

5.11. На заседании, состоявшемся 16 января 1942 г., имело место неофициальное обсуждение различных методов производства и ориентировочные оценки того, в какие сроки эти методы дадут результаты. Эти предвидения были не более, как догадки, так как имевшиеся в то время научные данные были весьма неполны,

и к задаче применения таких данных к строительству и эксплоатации производственных установок вряд ли тогда можно было подойти.

ПЕРЕГРУППИРОВКА СИЛ В НАЧАЛЕ 1942 ГОДА

5.12. В середине января 1942 г. Комптон решил сосредоточить работу, за которую он отвечал, в Чикагском университете. В течение весны колумбийская группа под руководством Ферми с накопленными ею материалами и оборудованием и принстонская группа, изучавшая резонансное поглощение, были переведены в Чикаго. Несколько меньших групп в других местах продолжали работать под руководством Комптона. В Калифорнийском университете в Беркли было усилено исследование электромагнитного разделения в промышленном масштабе, и соответствующий проект разделения изотопов начал осуществляться в Принстоне. Исследования по разработке диффузионного процесса и производству тяжелой воды велись в Колумбийском университете под руководством Юри под общим наблюдением Мерфри; в Виргинском университете работы с центрифугами велись под руководством Бимса; такие же работы из Колумбийского университета были переданы лабораториям Standard Oil Development Co. в Бэйуэй (штат Нью-Джерси).

ДОКЛАД БУША ПРЕЗИДЕНТУ 9 МАРТА 1942 г.

5.13. В докладе, датированном 20 февраля 1942 г., Конант предлагал, чтобы работы были продвинуты во всех направлениях. В соответствии с этим 9 марта 1942 г. д-р Буш представил президенту доклад, отражающий общий оптимизм, но подчеркивающий ориентировочный характер выводов. В его докладе завершение Проекта предусматривалось в 1944 году. Кроме того, в докладе было предложено, чтобы в течение лета 1942 г. Военное министерство развернуло строительство промышленных установок.

РАССМОТРЕНИЕ ПРОГРАММЫ КОНАНТОМ

5.14. Программа по тяжелой воде в целом рассматривалась в марте и апреле 1942 г. В феврале и марте 1942 г. из Англии приехали Ф. Симон Гальбан и У. А. Акерс. В записке от 1 апреля 1942 г., адресованной Бушу, Конант сделал обзор поло-

жения и сообщил о совещаниях с Комптоном и Бригсом. В его докладе отмечалось, что для завода по производству плутония потребуется большое количество тяжелой воды, применяемой вместо графита в качестве замедлителя. По этой причине он отнесся отрицательно к предложению обратиться к Гальба́ну с просьбой привезти из Англии 165 литров тяжелой воды, которыми Гальбан тогда располагал.

5.15. В записке Бушу от 14 мая 1942 г. (незадолго до предполагаемого заседания руководителей программы) Конант указал на пять различных методов получения материалов для бомб, которые могли оказаться одинаково успешными: метод центрифугирования, диффузионный и электромагнитный методы разделения U-235; методы уран-графитового котла и котла из урана с тяжелой водой для производства плутония. Разработка всех этих методов настолько продвинулась, что позволила приступить к строительству опытных установок и даже, может быть, к предварительному проектированию промышленных установок. Если бы эти методы получили техническое осуществление, то потребовались бы затраты в пятьсот миллионов долларов. Хотя слишком рано было говорить о сравнительных достоинствах каждого метода в отдельности, некоторые из них считались более быстрыми и эффективными, чем другие. Однако, существовала опасность, что отказ от какого-нибудь из методов мог вызвать серьезную задержку. Предполагалось, что немцы могут несколько опередить американцев в выполнении аналогичной программы.

5.16. Конант подчеркнул, что один вопрос является решающим для всего проекта по урану. Это — вопрос о том, будет ли атомная бомба решающим оружием или только дополнительным. Если она окажется решающим оружием, то не следует ограничивать усилий и денежных затрат для достижения цели. Однако, никто не знал, насколько эффективными окажутся атомные бомбы.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СЕКЦИИ S-1 ОСРД В ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ КОМИТЕТ ОСРД

5.17. В мае 1942 г. Конант предложил Бушу, чтобы вместо того, чтобы члены Секции обсуждали этапы своей работы с Конантом и Бригсом каждый в отдельности, Секция S-1 ОСРД заседала бы для общего обсуждения всей программы. Буш отве-

тил на это реорганизацией Секции S-1 ОСРД в Исполнительный комитет S-1 ОСРД, состоявший из: Дж. Б. Конанта (председатель), Л. Дж. Бригса, А. Х. Комптона, Э. О. Лоуренса, Э. В. Мерфри и Г. К. Юри. Г. Т. Венсель и И. Стюарт были избраны в Комитет в качестве технического консультанта и секретаря, соответственно.

5.18. В качестве консультантов в состав нового Комитета были введены следующие члены старой Секции S-1 ОСРД: С. К. Алисон, Дж. У. Бимс, Г. Брейт, Э. У. Кондон и Г. Д. Смит.

5.19. В функции нового Исполнительного комитета S-1 ОСРД входило: (a) сообщать о выполнении программы и бюджета по каждому методу на ближайшие восемнадцать месяцев, (b) представлять рекомендации относительно того, какие части программы следует продолжать разрабатывать; (c) представлять рекомендации относительно того, какие части программы следует исключить.

5.20. Предложения по вопросам политики Исполнительного комитета S-1 ОСРД и заключения контрактов решались большинством голосов Комитета. Конант воздерживался от голосования за исключением случаев, когда голоса разделялись. Хотя Буш имел право единолично утверждать политику ОСРД и расходовать фонды ОСРД, он обычно следовал рекомендациям Исполнительного Комитета S-1.

ДОКЛАД БУША И КОНАНТА ПРЕЗИДЕНТУ 17 ИЮНЯ 1942 г.

5.21. 13 июня 1942 г. Буш и Конант представили вице-президенту Генри А. Уоллесу, военному министру Генри Л. Стимсону и начальнику генерального штаба Джорджу К. Маршаллу доклад, рекомендующий план расширения проекта по атомной бомбе. Все трое одобрили этот доклад. 17 июня 1942 г. доклад был послан Бушем президенту, который также его одобрил. Доклад, который слишком длинен, чтобы его приводить полностью, содержал четыре главные части, в которых рассматривались: (a) положение дел с работой по оценке ведущих ученых, (b) рекомендации руководителей программы и Бюро технического планирования; (c) замечания Буша, Конанта и генерала В. Д. Стай-

ера; (d) рекомендации Буша и Конанта. Пункты (а) и (с) мы можем изложить следующим образом:

(а) *Выполнение программы.* (1) Было ясно, что количество U-235 или плутония в несколько килограммов могло бы дать взрыв, что такой взрыв был бы эквивалентен взрыву нескольких тысяч тонн тринитротолуола, и что такой взрыв мог бы быть вызван в любой момент. (2) Было ясно, что существует четыре метода производства радиоактивных веществ, способных испытывать деление, и что все эти методы приемлемы, но нельзя определенно утверждать, что какой-нибудь один из них лучше других. (3) Было ясно, что промышленные установки значительных размеров могут быть спроектированы и построены. (4) Считалось вероятным, что при наличии соответствующих фондов можно будет начать промышленное производство достаточно скоро, чтобы оно имело военное значение.

(с) *Замечания Буша, Конанта и генерала Стайера.* Лоуренс, Юри, Комптон и Мерфри внесли некоторые предложения. Эти предложения были рассмотрены Бушем, Конантом и генералом Стайером (который получил инструкции от генерала Маршалла проследить за ходом выполнения программы). Их замечания относительно программы сводились к следующему: (1) Если с точки зрения высоко компетентных ученых все четыре метода могут быть успешно применены, то вполне вероятно, что желаемый конечный результат может быть достигнут и противником, при условии, что он располагает достаточным временем. (2) Предложенная программа, очевидно, не может быть быстро выполнена без ущерба для других областей как в отношении научно-исследовательских кадров, так и в отношении дефицитных материалов. Следует произвести выбор между военным результатом, который кажется непосредственно достижимым, и неприкосновенностью ресурсов других областей военной деятельности. (3) Было бы неосторожно, ввиду неисследованности характера всего предприятия, концентрировать внимание лишь на одном способе получения результатов. (4) Поэтому представляется наилучшим немедленно приступить к выполнению тех частей программы, которые менее всего переплетаются с другими видами военной деятельности. Работа над остальными частями программы может проводиться после того,

как будут разрешены вопросы вмешательства в другие области военной деятельности.

5.22. Доклад президенту от 13 июня 1942 г. и письмо Буша, датированное 17 июня 1942 г., были возвращены Бушу с одобрением президента. Копия доклада была послана Бушем генералу Стайеру 19 июня 1942 г.

НАЗНАЧЕНИЕ ПОЛКОВНИКА ДЖ. К. МАРШАЛЛА

5.23. 18 июня 1942 г. полковник Дж. К. Маршалл (инженерные войска) получил указание от начальника Инженерной службы образовать новый округ инженерных войск для выполнения специальной работы (атомная бомба). Этот округ был официально учрежден 13 августа 1942 г. и назван «Манхэттенский Округ». Работа, которую проводил этот «округ», была в целях секретности названа «Проект ДСМ» (Development of Substitute Materials — разработка заменяющих материалов).

НАЗНАЧЕНИЕ ГЕНЕРАЛА Л. Р. ГРОУВЗА

5.24. 17 сентября 1942 г. военный министр возложил всю ответственность за военную деятельность по Проекту ДСМ на бригадного генерала Л. Р. Гроувза (Инженерная служба).

КОМИТЕТ ВОЕННОЙ ПОЛИТИКИ

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КОМИТЕТОВ ООРД

5.25. 23 сентября 1942 г. состоялось совещание лиц, назначенных президентом для выработки общей политики в проведении Проекта, и других лиц. На совещании присутствовали: военный министр Генри Л. Стимсон, начальник генерального штаба генерал Джордж К. Маршалл, д-р Дж. Г. Конант, д-р В. Буш, генерал-майор Брион Сомервелл, генерал-майор В. Д. Стайер и бригадный генерал Л. Р. Гроувз (вице-президент Генри А. Уоллес присутствовать не смог). Был назначен Комитет Военной Политики, состоявший из д-ра В. Буша, в качестве председателя, д-ра Дж. Б. Конанта, его заместителя, генерал-майора В. Д. Стайера и контр-адмирала В. Р. Парнелла. Генералу Гроувзу было поручено присутствовать на заседаниях Комитета и действовать в качестве уполномоченного по осуществлению намеченной политики.

Обязанностью этого комитета было планирование военной политики в отношении материалов, исследований и разработки производства, стратегии и тактики и представление периодических докладов политической группе, назначенной президентом.

5.26. Назначение Комитета военной политики было одобрено Объединенным комитетом нового оружия (U. S. Joint New Weapons Committee), учрежденным Совещанием начальников штабов (U. S. Joint Chiefs of Staff), состоящим из д-ра В. Буша, контр-адмирала В. Р. Парнелла и бригадного генерала Р. Дж. Мозеса.

5.27. Созданием Комитета военной политики все части Проекта ДСМ были отданы фактически под контроль д-ра Буша, д-ра Конанта, генерала Стайера, адмирала Парнелла и генерала Гроувза.

5.28. С июня 1942 г. по май 1943 г. Исполнительный комитет S-1 ОСРД заседал примерно раз в месяц и один раз после этого периода — в сентябре 1943 г. В этих заседаниях обычно участвовали: генерал Гроувз — после сентября 1942 г. и полковник Маршалл, и, часто, представители промышленных компаний, связанных с производственными предприятиями. Рекомендации Комитета не носили принудительного характера, но обычно принимались. Таким образом Комитет играл роль консультативной организации при д-ре Буше и генерале Гроувзе и роль связующего звена между научными, промышленными и военными частями Проекта ДСМ. Формально Исполнительный комитет никогда распущен не был, но деятельность его прекратилась с осени 1943 г.

5.29. Технические функции и вопросы снабжения были от Бюро технического планирования переданы Манхэттенскому Округу летом 1942 г., и с этих пор Бюро прекратило свою деятельность.

5.30. К весне 1943 г. выявилась необходимость передачи Манхэттенскому Округу контрактов на научно-исследовательские работы от ОСРД. Эта передача произошла 1 мая 1943 г. и означала прекращение формальной связи ОСРД с проектом по урану.

5.31. В июле 1943 г. Конант и Р. Ч. Толмэн были официально приглашены генералом Гроувзом в качестве его научных советников. Неофициально они уже выполняли эти функции и теперь лишь оформили свою деятельность. Координирование между раз-

личными научными и техническими программами осуществлялось путем встреч генерала Гроувза с руководителями различных проектов, в частности, с Комптоном, Лоуренсом, Оппенгеймером (см. главу XII) и Юри.

ПОСЛЕДУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ; «МАНХЭТТЕНСКИЙ ОКРУГ»

5.32. С 1943 года не произошло каких-либо важных изменений в форме организации, и было мало важных персональных изменений. Генерал Гроувз продолжал нести главную ответственность за направление общих усилий на военные цели. Его обязанностью было следить за тем, чтобы выполнение всех частей Проекта шло равномерно, чтобы различные заводы были обеспечены сырьем; он должен был устанавливать производственные графики, обеспечивать разработку проекта бомбы в согласии с производственными графиками, договариваться об использовании бомб, когда придет время, и обеспечивать соответствующую систему мероприятий по засекречиванию. В выполнении этих обязанностей генерал Гроувз опирался на огромную организацию, состоявшую из гражданских ученых и инженеров и военных специалистов. Многие из гражданских лиц уже упоминались или будут упомянуты в последующих главах, в которых рассматриваются отдельные проекты.

Бригадный генерал Г. Ф. Фаррелл действовал в качестве уполномоченного генерала Гроувза в выполнении последующих важных стадий Проекта. Полковник К. Д. Никольс, окружной инженер «Манхэттенского Округа», со своим штабом на Клинтонском заводе, связан был с Проектом с 1942 года. Он был связан с исследовательской и производственной работой как по U-235, так и по плутонию и всегда проявлял исключительное понимание технических вопросов и их относительной важности. Следует упомянуть и двух других офицеров — полковника Ф. Т. Маттиаса и полковника С. Л. Уорена. Полковник Маттиас нес главную ответственность на заводе в Хэнфорде, выполняя свои функции с исключительным умением; его деятельность была связана как со строительным, так и с эксплоатационным этапами Проекта. Полковник Уорен был начальником медицинской службы «Манхэттенского Округа» и потому отвечал за охрану здоровья на всех стадиях осуществления Проекта.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ

5.33. К концу 1941 года был закончен общий пересмотр состояния проблемы урана в целом. В результате этого пересмотра Буш и его советники решили ускорить проведение работ и произвести реорганизацию. Это решение было одобрено президентом Рузвельтом. С января до начала лета 1942 г. работой по урану руководили Буш и Конант, поддерживавшие контакт с руководителями частей Проекта и с Бюро технического планирования. Летом 1942 г. Армия, через посредство Инженерной службы, начала играть активную роль в вопросах техники и снабжения; для этой цели был организован «Манхэттенский Округ». В сентябре 1942 г. был назначен Комитет Военной Политики в составе д-ра Буша, д-ра Конанта, генерала Стайера и адмирала Парнелла, который направлял общую деятельность по осуществлению всего Проекта. Также в сентябре генерал Гроувз был назначен ответственным за всю деятельность Армии по Проекту. Период объединенного контроля Армии и ОСРД продолжался весь апрель 1943 г., причем роль Армии все возрастала, по мере того, как развивалось полным ходом техническое осуществление Проекта. В мае 1943 г. контракты на ведение научно-исследовательских работ были переданы Инженерной службе; период объединенного контроля Армии и ОСРД кончился — начался период полного контроля Армии.

5.34. С первых же дней за осуществлением Проекта с интересом следил президент Рузвельт, который до самой своей смерти изучал и утверждал обширные программы Комитета Военной Политики. Президент Трумэн, как член сената США, знал о Проекте и его масштабах, но новейшие и исчерпывающие данные получил от военного министра и генерала Гроувза на совещании в Белом Доме, состоявшемся немедленно после его вступления в новую должность. С тех пор президент оказывал Проекту свою полную поддержку и постоянно следил за развитием работ.

ГЛАВА VI

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ В ЧИКАГО В 1942 г.

ВВЕДЕНИЕ

6.1. Как видно из глав IV и V, данные о возможности создания атомной бомбы, полученные к концу 1941 г., оправдывали необходимость расширения работ, и это расширение требовало административной реорганизации. Было общепризнано, что возможность создания атомной бомбы чудовищной разрушительной силы из концентрированного урана-235 или из нового элемента — плутония очень вероятна; поэтому было предложено составить широкую программу экспериментальных и теоретических работ как по разделению изотопов, так и по цепным реакциям.

Рассчитывали, что эти работы окончательно установят, может ли быть выделен U-235 из U-238 в достаточных количествах электромагнитным или статистическими методами; может ли установиться цепная реакция с природным ураном или его соединениями, и можно ли будет таким способом получать относительно большие количества плутония; можно ли будет полученный таким образом плутоний отделить от исходного вещества — урана. Предполагалось также, что намеченные программой исследования обеспечат Проект теоретическими и экспериментальными данными, необходимыми для конструирования бомбы, использующей цепную реакцию на быстрых нейтронах.

6.2. Как уже было указано в главе V, разработка проблемы разделения изотопов была передана группе Лоуренса и Юри, а остальные вопросы были поручены группе Комптона, которая была организована под условным названием «Металлургическая лаборатория» Чикагского университета. В этой и в последующих двух главах мы опишем работу Металлургической лаборатории и

связанных с ней других лабораторий вплоть до июня 1945 г. В остальных главах мы рассмотрим работы по разделению изотопов и работы группы по разработке бомбы, выделившейся из Металлургической лаборатории в начале 1943 г.

6.3. Нет смысла пытаться определять относительную важность вклада отдельных лабораторий в общий успех проектирования атомной бомбы. В настоящем отчете не делается такой попытки, и в нем нет соответствия между местом, отведенным для описания работ какой-либо группы, и возможностями или важностью этих работ. При решении вопроса, какой раздел проекта атомной бомбы должен быть обсужден раньше и более полно, мы руководствовались критерием общего интереса и военной тайны. Некоторые усовершенствования большой технической важности имеют небольшой общий интерес, другие — и интересные и важные — должны все еще держаться в секрете. С точки зрения такого критерия, приложенного к задачам и результатам деятельности различных лабораторий, организованных с тех пор, как были начаты работы в широком масштабе, наиболее подробно должна быть освещена деятельность Металлургической лаборатории.

ЗАДАЧИ

6.4. В соответствии с указанными целями, первоначальными задачами Металлургической лаборатории были: во-первых, найти систему, использующую нормальный уран, в которой могла бы итти цепная реакция; во-вторых, показать, что если такая цепная реакция будет осуществлена, то можно будет химически выделить плутоний из остального вещества; и, наконец, получить теоретические и экспериментальные данные для осуществления взрывной цепной реакции или с U-235, или с плутонием. Конечной целью лаборатории было подготовить планы производства плутония в широком масштабе для его использования в бомбах.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ

6.5. Лаборатория должна была не только заниматься стоящими перед ней первоочередными задачами, но одновременно иметь в виду конечную цель и работать над ней, исходя из предположения, что ближайшие цели будут достигнуты. Нельзя было

отложить изучение химии плутония до получения цепной реакции. Нужно было исходить из того, что плутоний будет выделен, и двигаться вперед с разработкой проектов его производства и применения. По мере накопления научных данных, формулировки задач непрерывно изменялись, и программы исследований пересматривались почти каждую неделю.

Группа экспериментаторов-физиков, специалистов по ядру, под руководством Э. Ферми в основном занималась вопросами цепной реакции; химическое отделение, организованное Ф. Г. Спедингом (в дальнейшем, последовательно, под руководством С. К. Алисона, И. Франка, В. К. Джонсона и Т. Хогнеса) занималось химией плутония и методами разделения; теоретическая группа под руководством Э. Вигнера — проектированием производственных котлов. Однако, эти задачи переплетались, и различные научные и технические вопросы, связанные с процессом деления, изучались в той группе, которая казалась наиболее подходящей для решения данной задачи. В марте 1942 г. во главе технической группы был поставлен Томас М. Мур. Остальные старшие сотрудники в этой группе были: М. К. Ливеретт, Дж. А. Уилер и К. М. Купер, позже сменивший Мура в качестве руководителя технического отдела. Летом 1942 г. стала очевидной важность проблемы охраны здоровья, и был организован отдел под руководством д-ра Р. С. Стоуна. Трудная задача организации и управления исследовательской лабораторией, увеличивающейся в размерах и сложности почти с быстротой взрыва, разрешалась директором лаборатории Р. Л. Доуном.

6.6. Мы решили посвятить эту главу работам 1942 г., так как в этом году 2 декабря была впервые осуществлена самопроизвольная цепная реакция и в это же время весь Чикагский проект оценивался комитетом, члены которого были подобраны специально по признаку наличия у них технической подготовки *). Это совпадение было знаменательным и вместе с тем выгодным для нашего отчета, так как каждое из указанных событий могло рассматриваться, как веха, обозначающая конец определенного этапа в работе Металлургической лаборатории. При подготовке к посе-

*) Этот комитет состоял из У. К. Льюиса, К. Г. Гринвольта, Т. К. Гэри и Роджера Вильямса; Э. В. Мерфри был также член комитета, но по болезни не имел возможности принять участие в его работе.

щению членов этого комитета, был составлен исчерпывающий доклад, известный под названием Feasibility report, который был широко использован при подготовке данной главы.

ПЛАН ЭТОЙ ГЛАВЫ

6.7. В этой главе материал представлен согласно последовательности указанных выше задач. В части I рассматриваются успехи в разрешении начальных задач, включая: (a) накопление материалов, (b) экспериментальное доказательство цепной реакции, (c) химию плутония и некоторые вопросы разделения, (d) некоторые из выполненных вспомогательных работ, и наконец, (e) работы по «быстрым нейтронам». Естественно, работы, описываемые детально, представляют только пример большого количества фактически выполненных теоретических и экспериментальных исследований. В части II мы рассмотрим возможности промышленных котлов и методов разделения и специальные предложения, сделанные в ноябре 1942 г.

Часть I

УСПЕХИ В РАЗРЕШЕНИИ ОСНОВНЫХ ЗАДАЧ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАТЕРИАЛАМИ

ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

6.8. Как уже выяснилось из предыдущих глав настоящего отчета, снабжение материалами достаточной чистоты представляло главную часть всей проблемы. Что касается урана, то казалось очевидным, что необходимо будет иметь его в виде металла высокой чистоты или, по меньшей мере, в виде очень чистой окиси. Другими материалами, которые оказывались необходимыми, были графит, тяжелая вода и, возможно, также бериллий. К тому времени уже было ясно, что, каковы бы ни были преимущества тяжелой воды для применения в качестве замедлителя; ее нельзя будет получить в больших количествах в течение месяцев или лет. Бериллий имел меньшие преимущества, причем добыть его было так же трудно. Поэтому все усилия были сосредоточены на полу-

чении графита в качестве материала для замедлителя. Как уже указывалось в главе V, обеспечение ураном и графитом первоначально не было возложено на Металлургическую лабораторию, а было передано через Мерфри и других Бюро технического планирования. Фактически же очевидная заинтересованность Металлургической лаборатории в разрешении этой проблемы приводила к беспрерывному вмешательству лаборатории через ее представителей. Большая доля заслуг в достижении конечного успеха в получении материалов принадлежит Н. Хилбери, а позже Р. Л. Доуну, постоянно поддерживаемых А. Х. Комптоном.

УРАНОВАЯ РУДА

6.9. Очевидно, не было бы никакого основания предпринимать осуществление Проекта, если бы не была найдена возможность получать уран в достаточном количестве для производства бомб. Прежние данные были благоприятны, а тщательная разведка, проведенная в ноябре 1942 г., показала, что возможно наладить немедленную разработку урановых руд в достаточных количествах.

ОКИСЬ УРАНА И МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ УРАН

6.10. В конце 1941 года все количество наличного металлического урана составляло несколько граммов металла хорошего качества, произведенного, в виде эксперимента, фирмой Westinghouse Electric Manufacturing Co. и другими, и несколько фунтов весьма загрязненного пирофорного порошка, произведенного фирмой Metal Hydrides Co. Единственное сырье, которым можно было в то время располагать в США в значительных количествах, была коммерческая черная окись урана, которую можно было получить в ограниченных количествах от Canadian Radium and Uranium Co. Эта окись содержала от 2 до 5% примесей и при использовании ее в экспоненциальных опытах коэффициент размножения нейтронов был равен приблизительно 0,87.

6.11. К маю 1942 г. стала поступать черная окись высокой очистки и более однородной структуры, в количестве в среднем 15 тонн в месяц. Общее количество примесей составляло менее 1%, примесь бора составляла несколько частей на миллион, и коэффициент размножения нейтронов был равен около 0,98.

(Вспомним, что коэффициент размножения зависит также и от чистоты графита). Поставка окиси урана в сентябре 1942 г. достигла одной тонны в день.

6.12. Опыты, произведенные Дж. И. Гофманом в Национальном Бюро Стандартов, показали, что при извлечении эфиром все примеси удаляются при одном извлечении уранил-нитрата. Применение этого метода устранило множество затруднений в получении чистой окиси и чистых материалов для производства металлического урана. В начале мая 1942 г. были закончены переговоры с химическими заводами Малинкродта в Сен-Луи (Mallinckrodt Chemical Works) о пуске в производство нового вида окиси, получаемой в процессе извлечения эфиром, для дальнейшего снижения содержащихся в ней примесей и о поставке конечного продукта в виде коричневой двуокиси. Поставки начались в июле 1942 года в количестве 30 тонн в месяц. Эта окись в настоящее время служит исходным материалом во всем производстве металлического урана, и более высокой степени очистки в промышленных масштабах ожидать нельзя. И действительно, разработка и пуск в производство процесса в масштабах порядка одной тонны в день, позволяющего превратить весьма загрязненную коммерческую окись в продукт такой степени чистоты, которая редко достигается даже в лабораторных масштабах, представляли выдающееся достижение.

6.13. Процессом, который применяла фирма Вестингауза для производства урана, был электролиз KUF_5, что обходилось около 1000 долларов за фунт. Так как KUF_5 получался фотохимическим методом под действием солнечного света, то получение его представляло узкое место в производстве. Было найдено, что вместо KUF_5 можно применять четырехокись, и были предприняты шаги к тому, чтобы эта соль производилась фирмой Harshaw Chemical Co. в Кливленде и заводами Дюпона в Пенсгруве (штат Нью Джерси). Производство было начато в августе 1942 года и к октябрю того же года достигло 700 фунтов в день у Харшоу и 300 фунтов в день у Дюпона; методом производства в обоих случаях была гидрофлуоризация двуокиси, очищенной на заводах Малинкродта.

6.14. В результате такого снабжения Вестингауза сырьем и расширения завода поставки от Вестингауза достигли в общем

более, чем 6000 фунтов к ноябрю 1942 г., и ожидалось, что производительность достигнет 500 фунтов в день в январе 1943 года. Чистота металла была хорошей, а стоимость снизилась до 22 долларов за фунт.

6.15. По разным причинам, поставка приемлемого металла от фирмы Metal Hydrides Co. задерживалась и началась только в ноябре 1942 года. Предполагалось, что впоследствии продукция этой компании достигнет 1000 фунтов в неделю.

6.16. Ни процесс, применявшийся Вестингаузом, ни процесс фирмы Metal Hydrides Co. не были вполне удовлетворительными. Большие усилия были направлены на ускорение производства металла; над этим независимо работали Ф. Г. Спединг с сотрудниками в колледже штата Айова в Эймсе и К. Дж. Родден в Национальном Бюро Стандартов, и в результате был разработан удовлетворительный метод. Оборудование для производства было установлено в Эймсе осенью 1942 года и уже к концу ноября давало более одной тонны. Процесс был исключительно прост, быстр и дешев.

6.17. Дальнейшие исследования показали, что возможны дополнительные изменения, улучшающие производство, и в середине 1943 года Спединг в Айова и другие, участвовавшие в этом деле окончательно приняли метод производства.

6.18. К концу 1942 г. Манхэттенский Округ заключил соглашение на увеличение продукции урана за счет большего использования заводов Малинкродта, фирмы Union Carbide and Carbon Corporation и фирмы Дюпон.

6.19. Подводя итоги, мы видим, что в течение большей части 1942 года металлический уран получить было практически невозможно; — это обстоятельство, как мы увидим ниже, сильно задержало развитие дела. Однако, вопросы производства металла были почти разрешены в конце 1942 г., и котел, построенный в ноябре 1942 г., содержал около 6 тонн металлического урана. Вся проблема снабжения металлом была принята на себя Манхэттенским Округом под общим руководством полковника Ругофа, ранее работавшего на заводах Малинкродта. С точки зрения Металлургического проекта, в дальнейшем не было серьезных задержек или затруднений, связанных с недостатком металла.

СНАБЖЕНИЕ ГРАФИТОМ

6.20. В начале 1942 года производство графита было все еще неудовлетворительно; разумеется, оно находилось в совершенно иных условиях, чем получение урана, поскольку промышленное производство графита было очень велико. Задача заключалась только в очистке и в первоочередности снабжения. В значительной степени благодаря усилиям Н. Хилбери были привлечены фирмы National Carbon Co. и Speer Carbon Co. По предложениям экспертов Национального Бюро Стандартов, эти фирмы могли производить графит высокой чистоты с поглощением нейтронов на 20% меньшим, чем у применявшегося ранее стандартного коммерческого графита. Хотя и в дальнейшем усилия, направленные на снижение примесей, имели некоторый успех, проблема очистки графита в основном была решена к середине 1942 г., и совместно с Управлением военного производства (War Production Board) были размещены большие заказы. Так же, как и в отношении урана, снабжение графитом было передано Манхэттенскому Округу.

ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

ДАЛЬНЕЙШИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

6.21. Ко времени организации Металлургического проекта большинство физиков, знакомых с состоянием вопроса, считали, что система, в которой будет развиваться цепная реакция, вероятно, осуществима, если можно будет получить достаточно чистый графит и чистый металлический уран. Было выполнено достаточное число работ по резонансному поглощению, по теории поглощения и диффузии нейтронов в котле и по промежуточным экспериментам, чтобы можно было рассчитать конструкцию решетки, которая имела бы очень большую вероятность поддержать цепную реакцию. Тем не менее, в экспериментальных данных и в приближениях, допущенных в теоретических вычислениях, была неопределенность. Предстоял выбор между двумя альтернативами: 1) построить котел по наилучшей возможной схеме; 2) произвести более точные определения ядерных постоянных, провести промежуточные эксперименты и улучшить расчеты. Едва ли можно было сомневаться, что первая альтернатива представлялась наи-

более быстро ведущей к цели — производству плутония. Было много существенных вопросов, которые могли быть быстрее разрешены в процессе действия котла, чем путем выполнения ряда экспериментов в небольших масштабах. К сожалению, в то время и еще в течение 9 месяцев нельзя было получить достаточного количества материалов. Поэтому пришлось выбрать вторую альтернативу, т. е. собрать все доступные сведения любыми имевшимися в распоряжении средствами.

6.22. Основной линией исследования была постановка ряда промежуточных экспериментов. В специальных условиях каждого промежуточного эксперимента можно было получить данные для проверки расчетов, основанных на отдельных вспомогательных опытах. Изменялось отношение окиси урана к графиту, применялись окиси различной чистоты, применялись блоки окиси различных размеров, различной формы и различной плотности, изменялись размеры решетки, испытывалось влияние окружения элементов окиси урана бериллием и парафином и, наконец, испытывались устройства с одинаковым типом решетки, но с различными общими размерами, чтобы проверить, будут ли одинаковы значения коэффициента размножения *k* (для бесконечных размеров), вычисленные на основании различных серий экспериментов. Э. Ферми занимался исследованием влияния примесей, С. К. Алисон — испытаниями решеток различных размеров. Все эти эксперименты укрепили уверенность группы физиков в правильности вычисленного значения *k* и в том, что можно построить котел с коэффициентом *k*, превышающим 1. В июле от Малинкродта было получено достаточное количество очищенной окиси урана для постройки промежуточной установки № 9. Так же, как и в предварительных экспериментах, радие-бериллиевый источник нейтронов помещался у основания решетки, и плотность нейтронов измерялась вдоль вертикальной оси котла. К этому времени уже было известно, что плотность нейтронов уменьшается экспоненциально с увеличением расстояния от источника нейтронов (отсюда часто употреблявшееся название «экспоненциальный опыт»), и что, исходя из этой скорости уменьшения, можно вычислить коэффициент размножения *k* для бесконечно большого котла с той же структурой решетки. Впервые коэффициент размножения *k*, вычисленный таким образом на основании экспериментальных ре-

зультатов, получился больше единицы (его значение оказалось равным 1,007). Еще до проведения этого эксперимента Комптон в докладе от 1 июля предсказывал, что можно будет получить значение k между 1,04 и 1,05 в котле, содержащем окись урана высокой очистки и графит, если только из котла будет удален воздух — для того, чтобы предотвратить поглощение нейтронов азотом.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ. ЗАПАЗДЫВАЮЩИЕ НЕЙТРОНЫ

6.23. Мы не будем упоминать множества различных вспомогательных экспериментов, выполненных за этот период. Однако, один такой эксперимент — изучение запаздывания нейтронов — мы рассмотрим, так как он представляет собою хороший пример тех экспериментов, какие приходилось выполнять, и так как в этом случае речь идет об эффекте, до сих пор не упоминавшемся, но чрезвычайно важном для управления котлом, в котором идет цепная реакция.

6.24. Из прежних исследований, из которых некоторые уже были опубликованы, известно, что около 1% нейтронов, испускаемых в процессе деления, выбрасывается не немедленно, а испускается в течение некоторого периода времени — явление, напоминающее β-излучение радиоактивных веществ с малым периодом полураспада. В опытах наблюдалось несколько периодов полураспада, самый продолжительный из которых имел порядок 1 минуты.

6.25. Уже сначала было ясно, что это время запаздывания приводит к своего рода инерции цепной реакции, позволяющей значительно облегчить управление. Если эффективный коэффициент размножения в котле несколько превысит значение 1, то плотность нейтронов не возрастет до опасных значений почти мгновенно, а будет нарастать постепенно, так что будет возможность ввести в действие управляющие устройства. (Другие интервалы времени, которые имеются в этом процессе, например, промежутки времени между соударениями, слишком малы, чтобы можно было ими воспользоваться).

6.26. Вследствие важности явления запаздывания нейтронов для управления было решено повторить и улучшить прежние измерения. (Тот факт, что это было скорее повторение, а не новые

измерения, также типичен для значительной части работ по физике в этот период). Описание этого опыта приведено в Приложении 3. Результаты эксперимента показали, что 1% нейтронов, испускаемых при делении урана, запаздывает по меньшей мере на 0,01 секунды и что около 0,7% запаздывают даже на целую минуту. Проектируя котел так, чтобы эффективное значение коэффициента размножения *k* было равно только 1,01, можно получить достаточное число запаздывающих нейтронов, чтобы добиться легкого управления.

ПЕРВЫЙ КОТЕЛ С САМОРАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИЕЙ

6.27. К осени 1942 года в Чикаго можно было получить достаточно графита, окиси урана и металлического урана для того, чтобы сделать попытку построить настоящий котел с саморазвивающейся цепной реакцией. Однако, количество имевшегося в распоряжении металлического урана было мало — только около 6 тонн, да и другие материалы также имелись не в изобилии и были различного качества. Именно эти условия, больше, чем оптимальная эффективность, определяли проектирование.

6.28. Котел был построен с графитом в качестве замедлителя и блоками металлического урана или окиси в качестве реагирующих элементов, правильно расположенными в графите в виде решетки. Приборы, расположенные в различных точках котла или вблизи его, указывали интенсивность нейтронов, а передвижные стержни из поглощающего вещества служили для управления (более полное описание котла дано в Приложении 4). Так как в котле неизбежно существуют нейтроны спонтанного деления или других источников, было ясно, что реакция начнется тотчас же, как только конструкция достигнет критических размеров, если управляющие стержни не будут поставлены в положение «задержки». Вследствие этого, управляющие стержни ставились в соответствующее положение «задержки» с самого начала, и интенсивность нейтронов часто измерялась. Это оказалось счастливым обстоятельством, так как обнаружилось, что подход к критическому состоянию происходит на более ранней стадии сборки, чем это предполагалось заранее.

6.29. Впервые котел начал действовать 2 декабря 1942 г. Насколько нам известно, это был первый случай, когда человеку

удалось создать самоподдерживающуюся ядерную цепную реакцию. Первоначально котел действовал при мощности в ½W, но 12 декабря мощность была повышена до 200 W.

ЭНЕРГИЯ, ВЫДЕЛЯЮЩАЯСЯ В КОТЛЕ

6.30. При этих экспериментах прямых измерений выделяющейся энергии не производилось. Число нейтронов, испускаемых котлом в секунду, выражалось через активность стандартных листочков индия. По известному числу нейтронов, освобождаемых на каждое деление, вычислялось количество выделяющейся энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

6.31. Эксперимент, осуществленный 2 декабря — как раз тогда, когда Обзорный комитет оценивал Чикагский проект, давал не оставляющий и тени сомнения ответ на первый вопрос, стоявший перед Металлургической лабораторией: самоподдерживающаяся ядерная цепная реакция была получена в установке, применяющей нормальный уран. Эксперимент был выполнен под общим руководством Э. Ферми с помощью, главным образом, групп, возглавляемых У. Г. Цинном и Г. Л. Андерсоном. На обязанности В. К. Вильсона и его группы лежала в основном разработка приборов и органов управления; многие другие работники этой лаборатории способствовали успеху всей этой работы.

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ МОЩНОСТЬЮ И ПРОИЗВОДСТВОМ ПЛУТОНИЯ

6.32. Непосредственной целью постройки урано-графитового котла было — доказать, что существуют условия, при которых произойдет цепная реакция; конечной же целью лаборатории было производство плутония при помощи цепной реакции. Поэтому интересно найти зависимость между мощностью, при которой котел работает, и количествами производимого им плутония. В первом приближении эту зависимость можно оценить довольно легко. Устойчиво работающий котел должен производить столько же нейтронов, сколько он их теряет. На каждый тепловой нейтрон, поглощенный ураном-235, испускается определенное число η нейтронов. Для поддержания цепной реакции необходим один из этих нейтронов. Отсюда предполагая, что все остальные нейтроны поглощаются ураном-238 для образования плутония, получим, что на каждое деление будет образовано $\eta - 1$ атомов Pu^{239}.

Каждое деление приближенно освобождает 200 MeV энергии. Поэтому образование $\eta - 1$ атомов плутония сопровождается освобождением около 200 MeV. Так как $\eta - 1$ малое число, то видно, что для производства в котле одного килограмма плутония в день необходимо, чтобы котел освобождал от 500 000 до 1 500 000 kW энергии. Первый котел, который мы только что описывали, имел мощность 200 W. Считая, что одна бомба потребует от одного до 100 *кг* плутония, мы приходим к выводу, что описанный котел должен был бы непрерывно действовать по меньшей мере 70 000 лет для того, чтобы произвести одну бомбу. Очевидно, количественная проблема производства плутония еще не была решена.

ХИМИЯ ПЛУТОНИЯ

6.33. Второй специальной задачей Металлургической лаборатории было — показать, что если цепная реакция получится, то можно будет отделить плутоний химическим путем от других веществ, вместе с которыми он находится. Успехи в достижении этой цели были меньше, чем в осуществлении цепной реакции. Сначала Металлургическая лаборатория мало занималась химическими вопросами, хотя задача выделения плутония обсуждалась на конференции вскоре после того, как был организован Металлургический проект и была стимулирована работа группы Сиборга по плутонию в Калифорнийском университете. 22—23 апреля 1942 г. состоялась общая конференция по химии в Чикаго, на которой присутствовали: Ф. Г. Спединг, Э. В. Тиле, Дж. Т. Сиборг, Дж. В. Кеннеди, Г. К. Юри, Э. Вигнер, Н. Хилбери, Дж. Э. Бойд, И. Б. Джонс, Г. А. Вильгельм, И. Перльман, А. К. Валь и Дж. А. Уилер. Открывая собрание, Спединг подчеркнул, что перед химиками стоят две главные задачи: первая — выделить плутоний в достаточных количествах и достаточной чистоты, необходимых для военных целей; вторая — добиться хорошей разработки тех вопросов химии, которые необходимы для постройки и эксплоатации котла. Проблема выделения плутония должна была изучаться новой группой под руководством Сиборга в Чикаго, Джонсоном и Вильгельмом в Эймсе и Валем и Кеннеди, продолжающими работу в Калифорнии. Другими группами, близко примыкающими к указанным в Чикаго, были: группа К. Д. Корайла, работающая над вопросами химии продуктов деления, и группа

Бойда, занятая аналитическими проблемами. С того времени группа химии в Чикаго быстро разрослась. Для размещения ее в конце 1942 года пришлось построить специальное здание, которое впоследствии было расширено. В общем, разрешение многих химических вопросов было одним из наиболее замечательных достижений Металлургической лаборатории.

6.34. Первым открытым и изученным изотопом плутония был не изотоп 239, а изотоп 238, испускающий α-лучи и имеющий период полураспада около 50 лет. U-238, бомбардируемый дейтронами, дает ${}_{93}Np^{238}$, который испытывает β-распад, превращаясь в ${}_{94}Pu^{238}$ (см. рис. 1 на стр. 18). Первое доказательство действительного существования этих новых элементов (устраняющее первоначальную ошибочную интерпретацию расщепления урана, как доказательства их существования) было получено Э. Макмилленом и П. Г. Абельсоном, которые выделили ${}_{93}Np^{238}$ из урана, бомбардируемого дейтронами циклотрона в Беркли. Этот новый элемент был отожествлен, как β-излучатель, но образец был слишком мал, чтобы можно было выделить дочерний продукт ${}_{94}Pu^{238}$. Позднее было изготовлено достаточное количество Pu-238, что позволило Сиборгу, Кеннеди и Валю начать изучение его химических свойств зимою 1940—1941 г.г., применяя химию радиоактивных индикаторов с носителями, как это обычно практикуется в радиохимии. Такое изучение позволило определить многие химические свойства плутония, и было развито несколько возможных химических процессов, посредством которых Pu-239 может быть выделен из урана. Успехи этих экспериментов с радиоактивными индикаторами привели к решению производить достаточное количество Pu-239, чтобы обрабатывать его, как обычное вещество, в ультра-микрохимическом масштабе. Такие количества были получены продолжительной бомбардировкой нескольких сот фунтов уранил-нитрата нейтронами, полученными с помощью циклотронов, впервые в Беркли и позднее в Университете Вашингтона в Сен-Луи.

К концу 1942 года было получено немного более 500 μг в виде чистых солей плутония. Хотя это количество меньше, чем необходимо для изготовления головки ударника, оно позволило микрохимикам получить значительные сведения, так как химики считают, что для проведения экспериментов по взвешиванию, тит-

рованию, изучению растворимости и т. д. достаточно одного микрограмма.

6.35. Исходя из положения плутония в периодической таблице, можно было ожидать его сходства с редкими землями или ураном, торием или осмием. С каким из них он более схож, зависит, конечно, от расположения внешних электронов, а это расположение вряд ли могло быть предсказано. В результате оказалось, что плутоний более похож на уран, чем на любой другой из названных элементов, и его даже можно рассматривать, как второй член нового ряда редких земель, начинающегося с урана. Довольно рано было открыто, что имеются, по крайней мере, две степени окисления плутония (теперь известно, что имеются четыре — отвечающие положительным валентностям 3, 4, 5 и 6). Успешное изготовление некоторых солей плутония микрохимическим путем и изучение их свойств привели к общему заключению, что плутоний можно отделить химическим путем от других веществ в котле. Это заключение является решением второй неотложной задачи Металлургической лаборатории. Таким образом, к концу 1942 г. плутоний, совершенно неизвестный 18 месяцев ранее, считался элементом, химические свойства которого были так же хорошо изучены, как и свойства ряда давно известных элементов периодической системы.

РАЗЛИЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

6.36. Кроме основных проблем, которые мы отметили, т. е. цепной реакции, химического разделения и проектирования производственной установки, должно было быть разрешено бесчисленное множество второстепенных вопросов. Среди более важных из них были: улучшение счетчиков нейтронов, ионизационных камер и других приборов, изучение коррозии урана и алюминия под действием воды и других возможных охлаждающих веществ, определение влияния температуры на поперечные сечения для нейтронов, изготовление урановых стержней и трубок, изучение продуктов деления и определение биологических эффектов излучений. Как на типичный пример такого рода исследований, можно сослаться на разработку метода производства металлического урана и защитного покрытия для него, выполненную под руководством

Э. Кройтца. Без этих второстепенных исследований Проект не смог бы быть выполнен. Чтобы дать дальнейшее представление о размахе работ, в Приложении 5 приведены названия двадцати докладов, выбранных из 400 или около того, составленных в течение 1942 г.

РЕАКЦИЯ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

6.37. Третьей неотложной задачей Металлургического проекта являлось накопление теоретических и экспериментальных данных по реакции на «быстрых нейтронах», развивающейся в атомной бомбе. Эта работа была первоначально запроектирована и координирована Г. Брейтом (Висконсинский университет) и позже была продолжена И. Р. Оппенгеймером (Калифорнийский университет). Так как окончательная конструкция бомбы должна была быть заключительной частью Проекта, срочность изучения таких реакций была не так велика. Поэтому теоретическим вопросам уделялось мало внимания до лета 1942 г., когда в Чикаго была организована группа под руководством Оппенгеймера.

6.38. Тем временем, экспериментальные работы, начатые по инициативе Г. Брейта, успешно развивались под общим руководством Металлургического проекта в тех институтах, которые имели оборудование, пригодное для изучения быстрых нейтронов (Вашингтонский Институт Карнеги, Национальное Бюро Стандартов, Корнельский университет, Университет Пардью, Чикагский университет, Минезотский университет, Висконсинский университет, Калифорнийский университет, Университет Стэнфорда, Индианский университет и Институт Райса).

Темами исследовательских работ были: поперечные сечения рассеяния, поглощения и деления, спектр энергии нейтронов, освобождающихся при делении, запаздывание при испускании нейтронов при делении. Эти работы большей частью представляли промежуточную ступень, т. е. только проверяли и расширяли предшествующие измерения, и не давали новых окончательных выводов. Этот вид работ позднее был сосредоточен в другом месте (см. гл. XII).

6.39. Как было указано в одном из отчетов (Feasibility Report; раздел, написанный Дж. Г. Мэнни, И. Р. Оппенгеймером, Р. Сер-

бером, и Э. Теллером), за год со времени выпуска отчета Национальной Академии картина существенно изменилась только в одном отношении. Теперь теоретические исследования показали, что эффективность атомной бомбы, в части ее разрушительной силы, будет больше, чем указано в отчете Национальной Академии. Однако, ее критические размеры оставались все еще неизвестными. Методы детонации бомбы были исследованы лишь в некоторой степени, но в целом, определенный ответ не был получен.

Часть II

НА ПУТИ К КОНЕЧНОЙ ЦЕЛИ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ УСТАНОВКИ

ПЛАНИРОВАНИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

6.40. Как мы уже видели, первоочередные задачи Металлургической лаборатории были решены к концу 1942 г., но конечные цели — производство больших количеств плутония и проектирование и изготовление бомб — были все еще далеко не достигнуты. Ответственность за проектирование и изготовление бомб к этому времени была возложена на другую группу; ее работа описана в главе XII. Получение достаточных количеств Pu-239 осталось основной задачей Металлургической лаборатории, хотя с конца 1942 г. часть работ проводилась фирмой Дюпон.

6.41. На основании имеющихся данных можно было считать, что необходимо производить плутоний в пределах от одного килограмма в месяц до одного килограмма в день. Для производительности в 1 килограмм в день нужна была бы установка мощностью от 500 000 до 1 500 000 kW. (Предполагается, что предельная мощность гидроэлектрической станции у плотины Гранд-Кули будет около 2 000 000 kW). Очевидно создание плутониевой установки требуемых размеров должно было бы представлять собой грандиозное предприятие, даже без попыток использования освобождаемой тепловой энергии. Тем не менее, к ноябрю 1942 г. большинство задач было хорошо определено, и были намечены по-

пытки решения вопроса. Хотя эти проблемы будут подробно рассмотрены в следующей главе, мы упомянем о них уже здесь.

6.42. Так как в любом котле, производящем заметные количества плутония, выделяется большое количество тепла, первой проблемой при проектировании является система охлаждения. Прежде чем проектировать эту систему, необходимо было найти максимальную температуру, при которой котел может безопасно работать, и факторы — ядерные или конструктивные — которые определяют эту температуру. Другой большой проблемой, осложнявшейся к тому же системой защиты и охлаждения, являлся способ загрузки и выгрузки урана. Защита от излучений должна была быть запроектирована как для самого котла, так и для установки по химическому методу разделения. Характер разделительной установки зависит от применяемого процесса разделения, который следовало выбрать. И, наконец, быстрота снабжения материалами и постройки должна являться основным фактором при проектировании как котла, так и химической установки.

ВОЗМОЖНЫЕ ТИПЫ УСТАНОВКИ

6.43. После рассмотрения таких важных для постройки завода факторов, как охлаждение, эффективность, безопасность и быстрота постройки, Feasibility Report перечисляет следующие возможные типы установки в порядке их желательности:

I. (a) Решетка из обычного металлического урана в графитовом замедлителе с гелиевым охлаждением;
(b) то же самое, с водяным охлаждением;
(c) то же самое, с охлаждением расплавленным висмутом.

II. Решетка из обычного металлического урана в тяжелой воде, являющейся замедлителем.

III. Уран, обогащенный изотопом 235, с применением графита, тяжелой воды или обычной воды в качестве замедлителя.

Типы II и III не представляли непосредственного практического интереса, так как ни обогащенный уран, ни тяжелая вода не могли быть получены в достаточных количествах. Однако, разработка обоих этих методов продолжалась на случай, если другие типы окажутся неосуществимыми. Тип I(c), требующий охлаждения жидким висмутом, казался многообещающим с точки зрения использования выделяющейся тепловой энергии, но чувство-

валось, что связанные с такой установкой технические проблемы не могут быть разрешены в течение долгого времени.

ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА В КЛИНТОНЕ

6.44. В течение этого периода во второй половине 1942 г., когда проектировались производственные установки, было признано желательным строительство установки промежуточных размеров. Такая установка была нужна по двум причинам: во-первых, в качестве опытной установки, во-вторых, для производства нескольких граммов плутония для экспериментальных целей, в чем ощущалась острая нужда. Запроектированный с воздушным охлаждением котел промежуточных размеров мощностью в 1000 kW, построенный в Клинтоне (Тенесси), мог служит для обеих целей, если бы было сохранено гелиевое охлаждение для основной установки. Хотя проекты основной установки были переделаны на водяное охлаждение, опытная установка оставалась с воздушным охлаждением — в расчете, что вторая цель будет достигнута скорее. Таким образом она осталась опытной установкой только для химического разделения. Фактически основная установка была построена без помощи опытной установки в Клинтоне — как если бы гидроэлектрические генераторы станции Гранд Кули были запроектированы только на основании опыта работы генератора совершенно другого типа и ничтожной мощности.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ.

6.45. Как указывал Хилбери в Feasibility Report от 26 ноября 1942 г., перспективы графитового котла с гелиевым охлаждением казались многообещающими в отношении немедленного выпуска продукции; котел, использующий тяжелую воду в качестве замедлителя и тяжелую или обычную воду для охлаждения, представлялся более подходящим для конечного применения в установке промышленного масштаба. Был сделан ряд специальных предложений по строительству таких установок и по дальнейшему изучению возникших вопросов. Эти предложения базировались на оценках времени и стоимости, которые были, в силу необходимости, лишь грубыми догадками. В результате дальнейших исследований фактическая программа строительства, описанная в последующих главах, совершенно отличалась от предлагавшейся.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ

6.46. Проблема накопления материалов, которая задерживала движение вперед, была по существу разрешена к концу 1942 г. В ноябре 1942 г. был построен небольшой урано-графитовый котел с саморазвивающейся реакцией, и 2 декабря 1942 г. он был впервые пущен в работу с мощностью в ½ W, а позже — в 200 W. Он легко управлялся благодаря явлению запаздывания нейтронов.

С помощью циклотрона было получено и химически отделено от урана и продуктов деления 500 $\mu г$ плутония. Химия плутония была достаточно изучена, чтобы указать возможность его выделения в относительно больших масштабах. По теории бомб было сделано немного, но расчеты были проверены; были также расширены эксперименты с быстрыми нейтронами. Как бы то ни было, перспективы осуществления бомбы выглядели более благоприятно, чем год назад.

6.47. Для выяснения проблем, которые могли встретиться при конструировании и эксплоатации производственной установки большого масштаба, было сделано достаточно много экспериментов и проектов. Некоторые успехи были достигнуты в выборе типа установки, причем первый выбор в то время пал на котел из металлического урана и графита, охлаждаемый или гелием, или водой. Для строительства опытной и промышленной установок была разработана специальная программа. В этой программе приводились оценки времени и стоимости.

ГЛАВА VII

ПРОБЛЕМА ПЛУТОНИЯ В ФЕВРАЛЕ 1943 г.

ВВЕДЕНИЕ

НЕОБХОДИМОСТЬ РЕШЕНИЙ

7.1. К 1 января 1943 г. Металлургическая лаборатория выполнила свою первую задачу—создание котла, и успешно продвигалась по пути решения второй — извлечения плутония, получаемого в котле. Наступило время для составления окончательных проектов заводской установки. Политический комитет (см. главу V) на основании рекомендаций директора лаборатории А. Х. Комптона, Исполнительного комитета S-1 и Обзорного комитета (члены которого посетили Чикаго в декабре 1942 г) принял ряд решений, сводившихся, во-первых, к демонтажу первого котла и вторичной сборке его на небольшом расстоянии от Чикаго и, во-вторых, к постройке 1000-киловаттной плутониевой установки в Клинтоне (штат Тенесси).

МАСШТАБЫ ПРОИЗВОДСТВА

7.2. Прежде всего необходимо было определить требуемые масштабы производства. По соображениям секретности принятые цифры не могут быть здесь названы. Они очень велики.

ЗНАЧЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

7.3. Как мы уже видели, производство одного грамма плутония в сутки требует мощности котла от 500 до 1500 kW. Поэтому установка для промышленного производства плутония должна выделять очень большое количество энергии. Трудность задачи заключалась в конструировании установки большой мощности на основании экспериментов с котлом, работающим на мощности

лишь в 0,2 kW. Что касается не менее важной работы по выделению плутония, предстояло составить проекты установки для извлечения и очистки нескольких граммов плутония в сутки из нескольких тонн урана, причем основой для такого проектирования могли служить только данные микрохимического изучения с количеством Pu в 0,5 миллиграмма. Для проектирования больших котлов и установки по выделению плутония можно было использовать данные вспомогательных экспериментов и результаты детального изучения процессов разделения урана и плутония. Однако, и в этом случае предложенные экстраполяции относительно котла и процесса разделения были шатки. В мирное время ни один ученый или инженер, находящийся в здравом рассудке, не предпринял бы столь резкого увеличения масштаба, и даже во время войны только возможность получить чрезвычайно важные результаты могла служить оправданием этому.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЯЗАННОСТЕЙ

7.4. Как только было решено приступить к промышленному производству плутония, появилась необходимость в значительном организационном расширении. Вскоре после того, как Манхэттенский Округ в июне 1942 г. получил задание по строительству, в качестве сборочной и строительной фирмы по Проекту ДСМ была выделена фирма Стоун и Вебстер (Stone and Webster Engineering Corporation). К октябрю 1942 г. выяснилось, что различные части работы значительно удалены друг от друга и слишком технически сложны для выполнения одной фирмой. Это было особенно важно ввиду спешности задания. Поэтому признали целесообразным освободить фирму Стоун и Вебстер от производства оборудования для получения плутония. Генерал Гроувз выбрал фирму Дюпон (E. I. du Pont de Nemours and Co.), как наиболее подходящую для этой части работы. Соглашения, заключенные с разными промышленными компаниями Манхэттенским Округом, имели различные формы. Соглашение с фирмой Дюпон рассматривается здесь подробно, как типичное.

7.5. После длительных переговоров генерала Гроувза с руководителем фирмы Дюпон В. С. Карпентером фирма взялась выполнить работу. Изъявляя свое согласие, она подчеркнула, что принимает работу только потому, что, во-первых, Военное мини-

стерство считает ее чрезвычайно важной; во-вторых, потому, что генерал Гроувз заявил, что мнение о чрезвычайной важности работы разделяется лично президентом Соединенных Штатов, военным министром, начальником штаба и самим генералом Гроувзом, и, в-третьих, потому что генерал Гроувз считает фирму Дюпон организацией, наиболее способной выполнить это задание.

7.6. Фирма Дюпон, принимая заказ, согласилась с тем, что он будет выполняться ею без прибыли, а также без патентных прав. Однако, ввиду новизны области, в которой ей предлагали работать, она просила, чтобы правительство приняло все необходимые меры для ограждения фирмы от возможных убытков.

7.7. По договору с фирмой Дюпон правительство согласилось оплатить всю стоимость работ сразу или частями, предусмотренными договором на покрытие административных и общих расходов, в соответствии с обычной практикой фирмы — по определению ревизий, засвидетельствованных официальными представителями. По условиям договора, в том случае, если какая-либо часть этих выплат не будет в действительности израсходована фирмой, она подлежит возврату правительству. Договор предусматривал также, что никакие патентные права не будут распространяться на компанию.

7.8. Задачи, возложенные на фирму Дюпон, состояли в проектировании, конструировании и сооружении небольшой полузаводской установки в Клинтоне (шт. Тенесси) и проектировании, конструировании, сооружении и эксплоатации большой промышленной плутониевой установки в Хэнфорде (штат Вашингтон). Ввиду того, что первое задание было связано с фундаментальными исследованиями, клинтонская полузаводская установка должна была работать под руководством Чикагского университета. Многие инженерно-технические работники фирмы Дюпон должны были быть использованы на вспомогательной базе в Чикаго и Клинтоне, для удовлетворения нужд университета в людях, особенно в работниках с производственным опытом, и для подготовки персонала для будущей работы в Хэнфорде.

7.9. Так как фирме Дюпон предстояло перейти от нормальной для нее работы в области химии в новую область, связанную с ядерной физикой, было признано необходимым для проведения фундаментальных исследований, накопления опыта и консульта-

ций установить более тесную связь фирмы с Металлургической лабораторией Чикагского университета. Компания Дюпон имела технический и производственный опыт, однако, она нуждалась в Металлургической лаборатории для проведения экспериментов как радиохимических, так и в области ядерной физики. Металлургическая лаборатория связывала общие исследования по разработке проблемы с проектированием и эксплоатацией полузаводской и большой производственной установок. Она разрабатывала основные вопросы производства и извлечения плутония, а также конструкции необходимого оборудования, отвечала на множество специальных запросов фирмы Дюпон, изучала проекты фирмы Дюпон и содействовала их осуществлению.

7.10. Основная цель клинтонской полузаводской установки заключалась в развитии методов извлечения плутония. Полузаводская установка должна была включать в себя, конечно, и агрегат для производства плутония. По сложившимся обстоятельствам и по срокам клинтонская установка не могла быть построена, как первый вариант хэнфордской установки, и последнюю, поэтому, нужно было проектировать, строить и пускать в ход без использования опыта Клинтона. Хэнфордские разделительные установки пришлось конструировать и монтировать до получения результатов работы Клинтона. Однако, клинтонская полузаводская установка оказалась чрезвычайно полезной при решении большого числа совершенно новых задач, возникших при разработке хэнфордского проекта. Клинтонская установка производила, кроме того, небольшие количества плутония, что, вместе с данными Металлургической лаборатории о свойствах плутония, дало возможность ускорить на месяцы исследования этого вещества.

ВЫБОР МЕСТА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА УСТАНОВКИ

7.11. Как только была определена производительность установки и распределены обязанности, нужно было решить вопрос о характере установки и месте ее расположения. Как было рекомендовано в докладе президенту (см. главу V), участок в долине Тенесси, официально называемый «Клинтонским механическим заводом» (Clinton Engineer Works), был приобретен Армией.

7.12. Вторичное рассмотрение вопроса о выборе места для плутониевой установки в конце 1942 г. привело генерала Гроувза

к заключению, что выбранный участок недостаточно изолирован для плутониевой установки промышленного масштаба. В это же время стало очевидным, что могут возникнуть условия, при которых большой котел будет распространять радиоактивные вещества по такой большой площади, что создастся опасность для соседних населенных пунктов. В дополнение к требованию изолированности, оставалось требование снабжения большим количеством энергии, которое собственно и определило первоначальный выбор места в Тенесси. Новое место было выбрано на реке Колумбии в центральной части штата Вашингтон, вблизи линии передачи Гранд-Кули. Оно известно под названием «Хэнфордского механического завода» (Hanford Engineer Works).

7.13. Так как река Колумбия дает чистую холодную воду, хэнфордский участок хорошо подходил как для первоначально проектировавшейся установки с гелиевым охлаждением, так и для осуществленной в действительности установки с водяным охлаждением. Большие расстояния, разделявшие основное предприятие фирмы Дюпон в Вилмингтоне (Делавар), экспериментальную установку в Клинтоне (Тенесси), Металлургическую лабораторию в Чикаго и выбранное место в Хэнфорде, вызывали исключительные неудобства, но этих неудобств невозможно было избегнуть. Трудности были также и в доставке рабочих к намеченному месту строительства и в обеспечении необходимых жизненных условий для них.

ВЫБОР ТИПА УСТАНОВКИ

7.14. Мы находились еще в слишком ранней стадии работы, чтобы притти к тщательно обоснованному решению о наилучшем типе установки для производства плутония. Однако, выбор нужно было сделать, чтобы как можно скорее приступить к проектированию и постройке.

7.15. Первым вариантом, выбранным в ноябре 1942 г. Металлургической лабораторией, была установка с гелиевым охлаждением. Под руководством Т. Мура и М. К. Ливеретта был разработан предварительный проект такой установки. Связанные с проектом исследования послужили основой для выбора места, вспомогательного оборудования и т. д. Хотя предполагалось, что эти исследования для установки с гелиевым охлаждением можно бу-

дет провести быстрее, чем для установки с водяным охлаждением, было все же обнаружено много трудностей. Одновременно, теоретической группе под руководством Вигнера, в сотрудничестве с инженерным персоналом, было предложено подготовить доклад о мощной установке с водяным охлаждением. Эта группа разрабатывала вариант с водяным охлаждением почти с начала Проекта и уже 9 января 1943 г. была в состоянии представить доклад о результатах исследований. Доклад содержал много ценных мыслей, которые были использованы при проектировании промышленной установки в Хэнфорде.

7.16. Когда на сцену выступила фирма Дюпон, она сначала приняла предложение о сооружении установки с гелиевым охлаждением; после дальнейшего изучения вопроса фирма решила отдать преимущество водяному охлаждению. Причин изменения решения было много. Среди них отметим: опасность утечки находящегося под высоким давлением охлаждающего газа, содержащего радиоактивные примеси, трудности быстрого приобретения больших газодувок, необходимость больших количеств гелия, трудность загрузки и разгрузки урана и сравнительно низкую отдачу мощности на килограмм металлического урана. Эти обстоятельства нужно было сопоставить с специфическими недостатками установок с водяным охлаждением — с большой сложностью конструкции самого котла и опасностью коррозии.

7.17. Подобно многим другим решениям в этой работе, выбор между различными типами установок должен был основываться на недостаточных научных данных. При всем этом, однако, можно считать, что выбор водяного охлаждения был мудр.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ В ЦЕЛОМ

7.18. В главе II мы пытались дать общую характеристику проекта по урану, как он представлялся летом 1940 г. Теперь мы хотим дать точное определение задачи проектирования промышленной установки для производства плутония. Принятием решения об объеме производства, типе установки и месте ее расположения проект в общем был определен. Задача состояла в конструировании охлаждаемого водой котла с графитовым замедли-

телем (или нескольких таких котлов) в сочетании с химической разделительной установкой для производства установленного, относительно большого количества плутония, причем установка должна была быть построена в Хэнфорде на реке Колумбии. Незачем говорить, что скорость строительства и эффективность эксплоатации были при этом главными соображениями.

ТИП РЕШЕТКИ

7.19. Решетки, описанные нами ранее, состояли из блоков урана, расположенных в графитовом замедлителе. При применении этих решеток в производственных установках, возникают следующие затруднения: во-первых, трудно удалять уран без разборки котла, во-вторых, трудно осуществлять охлаждение блоков урана, которые являются центрами выделения тепла. Оба эти затруднения можно устранить, применив вместо точечной решетки стержневую, и концентрировать, следовательно, уран вдоль линий, проходящих через замедлитель, а не распределять его в отдельных точках. Совершенно ясно, что стержневое расположение удовлетворительно с механической и инженерной точек зрения, но можно было сомневаться в том, что и для стержневой решетки коэффициент размножения будет все еще больше единицы. Эта проблема встала перед физиками-теоретиками и экспериментаторами. Физики-теоретики должны были определить путем расчета оптимальный диаметр урановых стержней и расстояния между ними, а экспериментаторы — провести экспоненциальные эксперименты с решетками такого типа для проверки выводов теоретической группы.

РАЗГРУЗКА И ЗАГРУЗКА

7.20. Как только была принята решетка с цилиндрической симметрией, стало очевидно, что можно, не разбирая котла, разгружать и загружать уран, вынимая его из цилиндрических каналов в графитовом замедлителе и вкладывая туда последующие партии металла. Выбор нужно было сделать между длинными урановыми стержнями, представляющими преимущества с точки зрения физики ядра, и относительно короткими цилиндрическими столбиками, удобными в обращении. В обоих случаях материал обладал столь высокой радиоактивностью, что как разгрузка, так и все опера-

ции с выгруженным ураном должны были производиться при помощи управления на расстоянии из-за защитного укрытия.

ВОЗМОЖНЫЕ МАТЕРИАЛЫ; КОРРОЗИЯ

7.21. Если в качестве охладителя применяется вода, то она должна быть направлена в те области, где выделяется тепло, по особым каналам. Так как графитовые трубы непрактичны, то должны применяться трубы из других материалов. Ядерная физика ограничивает выбор материала для труб и других устройств котла. Трубы должны быть сделаны из такого материала, у которого поперечное сечение поглощения нейтронов не настолько велико, чтобы сделать k меньшим единицы. Материал труб не должен, кроме того, разрушаться под действием большой плотности нейтронного и γ-излучений, имеющих место в котле. Наконец, трубы должны удовлетворять всем обычным требованиям, предъявляемым к трубам охладительных систем: они должны не давать утечек, не корродировать и не коробиться.

7.22. С точки зрения ядерной физики для этой цели можно применять семь элементов (Pb, Bi, Be, Al, Mg, Zn, Sn), ни один из которых не обладает большим поперечным сечением поглощения нейтронов. Бериллиевые трубки получить невозможно, а из всех других металлов только алюминий можно считать пригодным с точки зрения коррозии. Однако, не было никакой уверенности, что алюминиевые трубы будут удовлетворительны, и сомнения относительно их коррозии оставались до тех пор, пока котел не был испытан в работе.

7.23. Помимо выбора материала для труб, нужно было также выбрать другие материалы, употребляемые в котле, с учетом критериев ядерной физики и требований устойчивости по отношению к радиоактивному излучению. Электро-изоляционные материалы, употребляемые в приборах, помещаемых в котел, не должны разрушаться под действием радиоактивного излучения. Естественно предположить, что когда приходится контрольную или экспериментальную пробу помещать в котел или удалять из него, то в результате пребывания этой пробы в котле она приобретает сильную радиоактивность, величина которой зависит от применяемого материала.

7.24. Наконец, не было известно, какое воздействие имеют поля излучений на графит и уран в котле. Позднее было обнаружено, что электрическое сопротивление, упругость и теплопроводность графита изменяются от интенсивного облучения нейтронами.

ЗАЩИТА УРАНА ОТ КОРРОЗИИ

7.25. Наиболее эффективным способом охлаждения было бы непосредственное соприкосновение потока воды с ураном, в котором выделяется тепло. Однако, этот способ исключен: уран химически реагирует с водой, что приводит к отравлению воды радиоактивным веществом и к разрушению блоков урана. Необходимо было, поэтому, найти метод защиты урана от непосредственного соприкосновения с водой. Были изучены две возможности: одна — покрытие (электролизом или погружением), другая — заключение урановых блоков в герметический защитный кожух. Как ни странно, эта «проблема оболочки» оказалась одной из самых трудных проблем, возникших при конструировании котла.

СНАБЖЕНИЕ ВОДОЙ

7.26. Проблема отвода тысяч киловатт энергии достаточно серьезна. Количество воды, необходимой для охлаждения, зависит, конечно, от максимальной температуры, до которой вода может быть безопасно нагрета, и от максимальной температуры воды, забираемой из реки Колумбии. Воды требовалось столько, сколько нужно для водоснабжения довольно большого города. Необходимо было предусмотреть насосную станцию, фильтрацию, установку для обработки воды и т. д. Система должна была быть весьма надежной; нужно было, поэтому, разработать быстро действующее устройство для моментального прекращения цепной реакции в котле в случае аварии в системе подачи воды. Так как было решено применять прямоточное охлаждение, вместо циркуляционного, необходим был отстойный бассейн, в котором осаждались бы перед возвращением воды в реку радиоактивные примеси, содержащиеся в воде. Объем пропускаемой воды должен был быть столь велик, что проблема ее радиоактивности становилась весьма важной, и поэтому следовало определить минимальное время выдерживания воды в отстойниках, в течение которого она становится абсолютно безопасной.

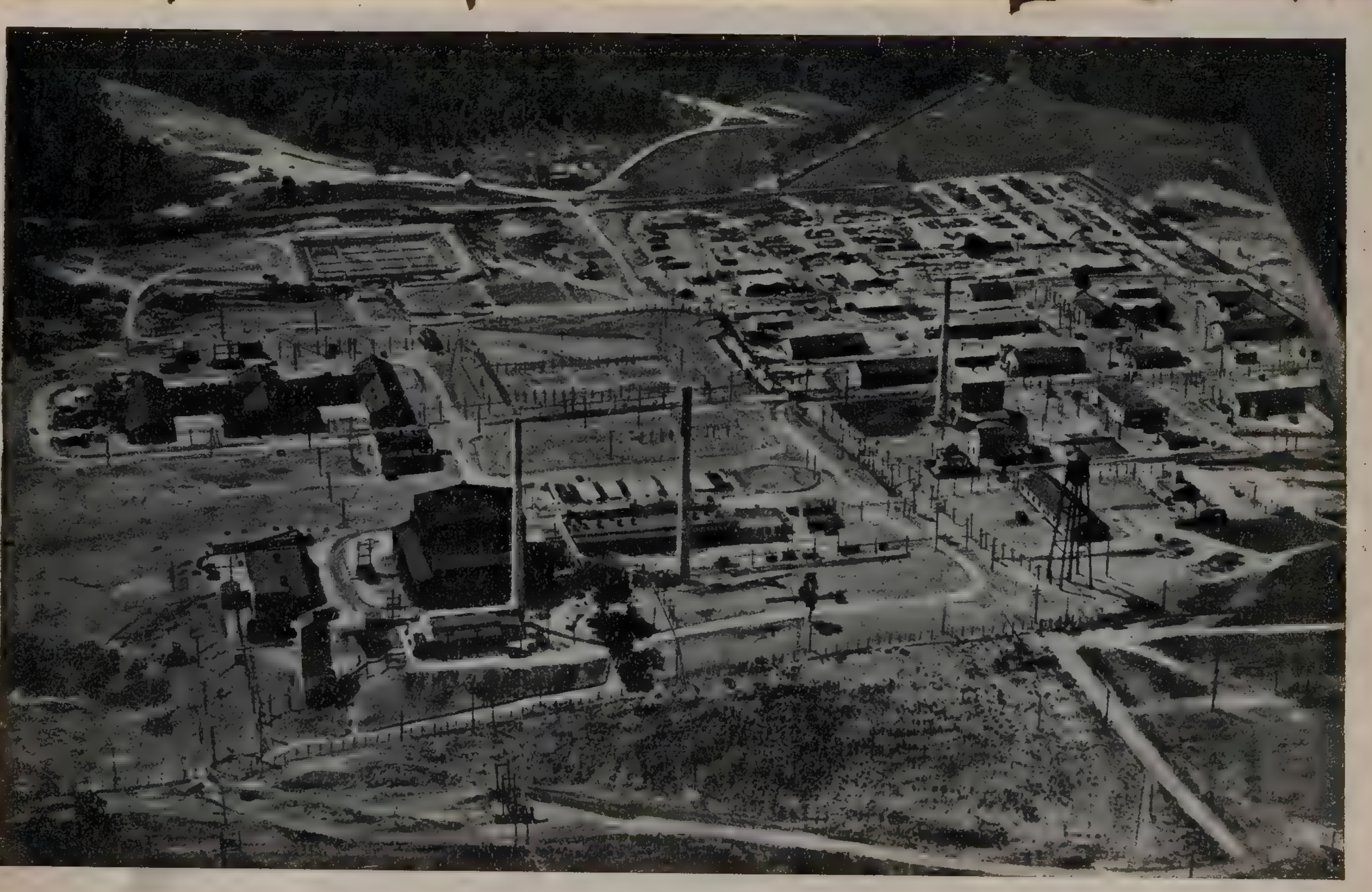
УПРАВЛЕНИЕ И ПРИБОРЫ

7.27. Задача управления была очень похожа на ту же задачу для первого котла, с тем лишь различием, что все здесь имело соответственно увеличенные размеры и поэтому представляло бо́льшую возможную опасность. Необходимо было обеспечить устройства, которые должны автоматически поддерживать работу котла на определенном уровне мощности. Эти устройства должны быть связаны с приборами внутри котла, измеряющими плотность нейтронов или какую-либо другую величину, дающую возможность судить о мощности котла. Следовало, далее, иметь аварийный контроль, который должен действовать почти мгновенно, если мощность котла обнаруживает тенденцию быстрого роста или в случае, когда возникают какие-либо перебои в снабжении водой. Было крайне желательно также иметь возможность получать указания о возникающих неполадках, например, о закупоривании отдельных труб или о повреждении оболочки одного из блоков урана. Весь этот контроль должен был осуществляться через толстую защитную стену.

ЗАЩИТА

7.28. Как мы уже неоднократно указывали, радиоактивное излучение котла, работающего на высокой мощности, столь интенсивно, что делает совершенно невозможным для обслуживающего персонала пребывание вблизи него. Более того, это излучение, в особенности нейтронное, имеет резко выраженную способность проникать через отверстия и трещины в препятствиях. Весь котел, поэтому, должен быть окружен очень толстыми стенами из бетона, стали или из какого-либо другого поглощающего материала. Вместе с тем должна быть предусмотрена возможность загрузки и разгрузки котла через эти стены и ввод и вывод воды через них. Защитные укрытия должны быть не только непроницаемы для радиоактивного излучения, но и газонепроницаемы, так как воздух, подвергшийся облучению в котле, становится радиоактивным.

7.29. Опасность излучения, вызывающая необходимость в защитном укрытии котла, распространяется также на всю площадь, занимаемую установкой для выделения плутония. Продукты деления, образующиеся при производстве плутония, обладают вы-



Опытная установка на Клинтонском механическом заводе в Ок-Ридже (шт. Тенесси).



Один из цехов Клинтонского механического завода в Ок-Ридже (шт. Тенесси).

сокой радиоактивностью, и оперирование с ураном после его изъятия из котла должно производиться через защитную стенку на расстоянии; кроме того, необходимо предусмотреть защитные мероприятия при транспортировке урана к разделительной установке. Все части работы разделительной установки, включая анализы, должны обслуживаться управлением на расстоянии через защитную стенку, вплоть до того момента, когда плутоний в значительной степени освободится от радиоактивных продуктов деления.

ОБСЛУЖИВАНИЕ

7.30. Проблема обслуживания формулируется весьма просто: не может быть никакого обслуживания внутри защитного ограждения, если котел работает. То же замечание относится в несколько меньшей мере к установке для выделения плутония. Для тех случаев, когда необходимо по условиям обслуживания остановить установку, должен быть предусмотрен соответствующий «обезвреживающий» процесс, проводимый для понижения интенсивности радиоактивного излучения ниже уровня, представляющего опасность для персонала. Проблемы эксплоатации вспомогательных частей установки обычны; исключение составляет необходимость в резервном насосном и силовом оборудовании на случай внезапной аварии системы охлаждения.

ГРАФИК ЗАГРУЗКИ И РАЗГРУЗКИ

7.31. Очевидно, что количество плутония в нормально работающей установке возрастает с временем работы. Поскольку Pu-239 сам подвергается делению, то его образование стимулирует цепную реакцию, в то время как постепенное исчезновение U-235 и появление продуктов деления с большим поперечным сечением поглощения нейтронов стремится остановить реакцию. Выбор момента остановки работающего котла и удаления плутония требует точного соответствия этих факторов с графиком времени, стоимостью материала, эффективностью процесса выделения и т. д. Точнее говоря, эта задача относится скорее к эксплоатации, чем к проектированию установки; однако, необходимо предусмотреть и эти вопросы, чтобы планировать загрузку урана в котел и передачу его на разделительную установку.

РАЗМЕРЫ УСТАНОВКИ

7.32. Мы говорили о производственной мощности установки, выраженной лишь через величину валовой продукции. Естественно, заданное количество продукции может быть получено в одном большом котле или в нескольких меньших. Принципиальное преимущество котлов меньших размеров заключается в уменьшении времени, необходимого для сооружения первого котла, в возможности вносить изменения в последующие котлы и — что, может быть, наиболее важно — в невероятности одновременного выхода из строя всех котлов. Неудобство малых котлов заключается в том, что они требуют непропорционально больших количеств урана, замедлителя и т. д. Очевидно имеются наиболее предпочтительные «оптимальные» размеры котла, которые можно приближенно определить из теоретических соображений.

ОБЩИЙ ХАРАКТЕР РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

7.33. Как мы уже подчеркивали, блоки урана, вынимаемые из котла, обладают высокой радиоактивностью и, поэтому, обращение с ними требует управления на расстоянии в защищенных укрытиях.

Общая схема, приведенная ниже, была предложена во второй половине 1942 г., в особенности в связи с проектами клинтонской разделительной установки. По этой схеме строился «каньон», который должен был состоять из ряда помещений с толстыми бетонными стенами и почти полностью врытых в землю. Каждое помещение должно было содержать растворяющие или осаждающие камеры или центрифуги. Блоки урана должны поступать в определенное помещение с одного конца каньона; там они растворяются и проходят через различные процессы растворения, осаждения, окисления или восстановления, пока в последнее отделение не поступает раствор плутония, свободный от урана и продуктов деления. Так же, как и в котле, все процессы должны управляться на расстоянии из помещения, находящегося на поверхности земли, но операции будут гораздо сложнее. Однако, основной характер химических операций не намного отличается от обычного поля деятельности химиков.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

7.34. В первых стадиях процесса извлечения даже обычный анализ образцов, который необходим для проверки операций в различных химических процессах, должен выполняться путем управления на расстоянии. Эти анализы упрощаются благодаря тому, что наряду со стандартным химическим анализом используются радиоактивные методы.

УДАЛЕНИЕ ОТХОДОВ

7.35. Исходный материал (уран) не обладает опасной радиоактивностью. Конечный продукт (плутоний) не испускает проникающего излучения; однако комбинация активности α-лучей и химических свойств Pu делают его одним из опаснейших веществ при попадании на тело. Особенно неприятными веществами являются продукты деления урана. Продукты деления чрезвычайно активны и содержат тридцать элементов. Среди них имеются радиоактивные ксенон и иод. Они выделяются в значительных количествах, когда блоки урана растворяются, и должны быть удалены с особой тщательностью. Необходимы высокие трубы, которые бы вытягивали эти газы вместе с кислотным дымом из первой растворяющей камеры, причем нужно установить, что смесь радиоактивных газов и воздуха не заражает окружающей территории.

7.36. В растворе может сохраниться много других продуктов деления, все они, однако, должны быть в конце концов полностью удалены. Разумеется, надо учитывать загрязнение реки. (Санитарные нормы в отношении загрязнения реки требуют, чтобы сточные воды не оказывали вредного влияния ни на людей, ни на рыбу).

РЕГЕНЕРАЦИЯ УРАНА

7.37. Очевидно, даже в том случае, когда уран был оставлен в котле до тех пор, пока весь U-235 не подвергнется делению, все же должно остаться большое количество U-238, не превратившегося в плутоний. В действительности процесс прекращается задолго до достижения этого состояния. Уран является дорогим материалом, и снабжение необходимым количеством урана очень ограничено. Поэтому необходимо изучить возможность регенера-

ции его после извлечения плутония. Вначале такая регенерация не имелась в виду, а предполагалось лишь сохранение раствора урана. Позже был разработан промышленный метод регенерации.

КОРРОЗИЯ В РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

7.38. В отличие от общеизвестных случаев коррозии, данный процесс корродирования происходит при высокой плотности радиоактивного излучения. Вследствие этого чаны корродируют значительно быстрее, чем при обычных обстоятельствах. Более того, такого рода коррозия значительно серьезнее из-за трудности доступа к пораженным участкам. В течение некоторого времени, к сожалению, на эту опасность не обращали должного внимания.

ВЛИЯНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ

7.39. Химические реакции, предложенные для процесса извлечения, были, конечно, испытаны в лаборатории. Однако, они не могли быть изучены с достаточно большими количествами плутония и не могли быть испытаны при наличии радиоактивного излучения, хоть в какой-нибудь мере приближающегося по своей интенсивности к ожидаемому. Поэтому было очевидно, что процесс, оказавшийся успешным в условиях лаборатории, может оказаться непригодным в установке.

ВЫБОР ПРОЦЕССА

7.40. Приведенное выше описание того, что происходит в последовательных отделениях «каньона», весьма приблизительно. Это объясняется тем, что вплоть до января 1943 г. не было принято решения о том, какой именно процесс следует применить для извлечения и очистки плутония. Главной задачей, стоявшей перед химическим отделом Металлургической лаборатории, был выбор лучшего процесса для установки.

ОХРАНА ЗДОРОВЬЯ

7.41. Кроме опасностей, обычно имеющихся при сооружении и эксплоатации большой химической установки, здесь возникли опасности нового рода. Опасными являлись два типа излучения: нейтроны, освобождающиеся в котле, и радиоактивное (α-, β- и γ-)

излучение, испускаемое продуктами котла. Хотя общее действие этих излучений на человеческий организм было признано подобным действию рентгеновских лучей, было все же желательно более детальное его изучение. Количество радиоактивных материалов, с которыми приходилось иметь дело, во много раз больше, чем те количества, которые употреблялись когда-либо прежде.

7.42. Медицинская группа должна была выполнить три задачи: (1) организацию измерений и клинических испытаний для обнаружения признаков опасной облученности персонала, (2) исследование влияния радиоактивного излучения на людей, приборы и т. д. и (3) определение необходимых свойств и размеров защитных укрытий и мероприятий по охране труда для учета их при постройке и разработке правил эксплоатации установки.

СВОЙСТВА ПЛУТОНИЯ

7.43. Несмотря на то, что мы намеревались создать большое предприятие по производству плутония, мы имели меньше миллиграмма его для изучения и лишь слабое представление о его свойствах. Изучение плутония, поэтому, составляло главную задачу Металлургической лаборатории.

ОБУЧЕНИЕ ПЕРСОНАЛА

7.44. Понятно, что работа на промышленной установке требовала большой и весьма подготовленной группы обслуживающего персонала. Хотя фирма Дюпон имела огромный опыт эксплоатации различного рода химических установок, это предприятие представляло собой нечто новое, и было очевидно, что обслуживающий персонал нуждается в специальном обучении. Такое обучение было проведено частью в Чикаго и его окрестностях, но, главным образом, в клинтонских лабораториях.

НЕОБХОДИМОСТЬ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7.45. В предыдущих параграфах этой главы мы перечислили задачи, с которыми пришлось встретиться группе, проектировавшей и строившей установку для производства плутония. В главе VI были рассмотрены достижения в этой области вплоть до конца 1942 г. Из этих глав стало понятно, что для обеспечения успеш-

ной работы установки требовались гораздо бо́льшие сведения, чем те, которые были в нашем распоряжении. Поэтому одновременно с проектированием и постройкой должны были проводиться и исследования.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРОГРАММА

7.46. В связи с необходимостью развития научных и технических исследований для Металлургической и Клинтонской лабораторий, была разработана программа исследовательских работ. Приведенный ниже отрывок взят из программы Металлургического Проекта на 1943 г.

«*Исследование производства плутония.* Сюда включаются все виды исследований, технические разработки и полузаводское изучение всех вопросов, необходимых для проектирования, постройки и эксплоатации котла для производства плутония или других материалов.

Характеристики котла. Теоретическое изучение и эксперименты с решеткой, имевшие целью выяснить поведение характеристик котла большой мощности: температуры и давления, нейтронных характеристик, отравления котла и т. д.

Управление котлами. Конструирование и испытание устройств для регулирования скорости реакции в котлах.

Охлаждение котлов. Физическое изучение охлаждающих веществ, технические проблемы циркуляции, коррозии, эрозии и т. д.

Приборы. Разработка конструкций приборов и техники управления установкой и определения радиоактивности на заводской территории.

Защита. Защитные укрытия, биологический эффект излучения котла и клиническое изучение влияния операций, связанных с котлом.

Материалы. Изучение физических (механических и ядерных) свойств строительных материалов и веществ, применяемых при сооружении и эксплоатации котла.

Исследования активации. Производство экспериментальных количеств радиоактивных материалов в циклотроне и в котлах и изучение активации материалов нейтронами, протонами, электронами, γ-лучами и т. д.

Работа котла. Изучение операций, необходимых для нормальной работы котла: загрузка и разгрузка, работа с приборами и т. д.

Проектирование процесса. Изучение возможного процесса производства в целом, ведущее к детальной разработке процессов отдельных его частей.

Исследование извлечения плутония. Сюда включаются все виды работы, необходимые для разработки как процесса извлечения плутония и возможных побочных продуктов котла, так и приготовления их в чистом виде. Основные усилия Металлургической лаборатории были направлены на разработку того процесса производства плутония, который был утвержден 1 июня 1943 г. Однако, другие варианты попрежнему подвергались исследованию в металлургической лаборатории и Клинтоне в той мере, в какой это было возможно.

Разделение. Процесс растворения урана, извлечения плутония и обезвреживания путем удаления продуктов деления.

Концентрирование, очистка и восстановление плутония. Процессы производства плутония в виде чистого металла и изучение тех свойств плутония, знание которых необходимо для его производства.

Отходы. Существующие новые и возможные методы извлечения продуктов деления и урана из отходов.

Приборы. Разработка и испытание контрольных приборов для химических процессов и для наблюдения за радиоактивностью на всей территории.

Защита. Изучение защитных экранов, определение биологических действий радиоактивной пыли, жидкостей, твердых тел и других материалов, участвующих в процессе, а также защитных мероприятий.

Материалы. Коррозия материалов оборудования, стойкость по отношению к воздействию радиоактивности. Необходимая чистота и методы анализа материалов, участвующих в процессе, и т. д.

Получение радиоактивных материалов. Разработка методов выделения радиоактивных материалов, полученных активацией в циклотроне и в котле.

Вопросы эксплоатации. Качество работы оборудования, контроль процесса, обращение с материалами и т. д.

Проектирование процесса. Изучение процесса выделения плутония в целом (мокрый процесс, физические методы), ведущее к детальной разработке отдельных вопросов.

Основные исследования. Изучение основных физических и химических явлений, происходящих в котлах, и изучение основных свойств всех употребляемых материалов. Хотя в Клинтоне наибольшее внимание уделяется полузаводской установке, многие основные исследования также потребуют клинтонских условий (большая интенсивность радиоактивного излучения, большой масштаб производства).

Ядерная физика. Основные свойства ядерного деления, поперечное сечение, выход нейтронов, типы деления и т. д. Другие свойства ядра, важные для процесса, например, поперечное сечение и свойства замедлителя, действие нейтронов на материалы и т. д.

Общая физика. Основные исследования с помощью приборов (электронные, ионизационные, оптические и т. д.), определение атомных масс, изучение нейтронов и α-, β- и γ-излучений, исследования рентгеновских лучей и т. д.

Химия радиоактивных излучений. Действие радиоактивного излучения на химические процессы и химические реакции, вызываемые излучением.

Ядерная химия. Прослеживание продуктов деления, постоянные распада, цепные реакции, исследование ядер, которые могут оказаться полезными для Проекта.

Химия продуктов. Химические свойства различных продуктов и основательное изучение разделения и очистки продуктов.

Общая химия. Химия основных материалов и материалов, связанных с процессом, включая и побочные продукты.

Общая биология. Фундаментальное изучение действия радиоактивного излучения на живые организмы, на обмен веществ и т. д.

Клинические исследования. Основные исследования, как то: гематологические, патологические и т. д.

Металлургические исследования. Изучение свойств U, Pu, Be и т. д.

Технические исследования. Явления, лежащие в основе коррозии, и другие вопросы, исследование которых необходимо для непрерывного технического развития процесса».

7.47. Рассмотрение этой программы дает представление о большом диапазоне исследований, проведенных для получения необходимых сведений. Многие из указанных здесь тем не являются такими научными проблемами, которые могут быть разрешены небольшой группой ученых в течение месяцев, и скорее представляют целые области для исследований в течение ряда лет. Необходимо было отобрать специальные вопросы, немедленно дающие полезные результаты; однако, одновременно было желательно работать над установлением основных принципов. Например, действие радиоактивного излучения на свойства материалов было почти совершенно не изучено. Необходимо было и эмпирическое изучение свойств отдельных материалов, используемых в котле, и создание общих теорий наблюдаемых явлений. Все усилия должны были быть направлены на главную цель: создание успешной производственной установки.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТА

7.48. В организации и в составе участников Проекта происходило много изменений. В течение бо́льшей части периода строительства в Клинтоне и в Хэнфорде А. Х. Комптон был директор Металлургического проекта; С. К. Алисон — директор Металлургической лаборатории в Чикаго и М. Д. Уитекер—директор Клинтонской лаборатории. Чикагская группа делилась на четыре отдела: физики, химии, технологии и здравоохранения. Позднее физический отдел был разбит на группы общей физики и ядерной физики. Р. Л. Доун был научный руководитель в Клинтоне; в Чикаго подобной должности не было. Назовем некоторых заместителей или помощников директоров лабораторий или проектов и директоров отделений: С. Т. Кантрил, К. М. Купер, Ф. Даниелс, А. Дж. Демпстер, Э. Ферми, И. Франк, Н. Хилберн, Т. Р. Хогнес, В. К. Джонсон, Г. Д. Смит, Дж. К. Стирнс, Р. С. Стоун, Г. К. Вернон, В. В. Ватсон и Э. Вигнер.

Начиная с 1943 г., К. Г. Томас из Monsanto Chemical Co., был председатель комитета по химии и металлургии плутония. Этот

комитет связывал деятельность Металлургической лаборатории с работой лабораторий в Лос-Аламосе (см. гл. XII) и других местах. Позднее Monsanto Chemical Co. провела некоторую работу по важным специальным вопросам, возникшим в связи с работой в Лос-Аламосе.

7.49. На ответственности этих людей было следить за успешным выполнением изложенной выше программы исследований, передавать существенные результаты фирме Дюпон. На их ответственности лежало также давать ответы на вопросы, возникающие у фирмы Дюпон, и одобрять или отвергать планы, предложенные на рассмотрение этой фирмой.

СОТРУДНИЧЕСТВО МЕЖДУ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИЕЙ И ФИРМОЙ ДЮПОН

7.50. Поскольку фирма Дюпон была проектирующей и строительной, а Металлургическая лаборатория — исследовательской организацией, тесное сотрудничество между ними было совершенно необходимо. Фирма Дюпон не только нуждалась в ответах на специальные вопросы, но и должна была получать помощь, критику и предложения по многим вопросам, хорошо известным Металлургической группе. Подобным же образом Металлургическая группа должна была пользоваться исследованиями фирмы Дюпон по многим техническим вопросам проектирования, строительства и эксплоатации. Для того, чтобы способствовать такого рода сотрудничеству, фирма Дюпон выделила одного из своих физиков, Дж. Б. Майлса, в Чикаго; многие другие работники фирмы, в частности К. Г. Гринволт, проводили бо̀льшую часть своего времени в Чикаго. Майлс и Гринволт регулярно посещали собрания лабораторного совета. Эта форма связи не была предусмотрена соглашением для работников Металлургической лаборатории, хотя некоторые члены лаборатории неофициально посещали Вилмингтон. Кроме того Н. А. Уилер был переведен из Чикаго в Вилмингтон и стал членом правления фирмы Дюпон. Существовал, конечно, постоянный обмен докладами и письмами и проводились частые совещания между Комптоном и Р. Вильямсом, представителем фирмы Дюпон. Уитекер проводил бо̀льшую часть своего времени в Вилмингтоне в то время, когда проектировалась и строилась клинтонская установка.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ

7.51. В январе 1943 г. было принято решение строить установку большой производительности для получения плутония. Это означало постройку котла мощностью в тысячи киловатт и завода по химическому выделению плутония. Компания Дюпон должна была проектировать, построить и эксплоатировать установку, Металлургическая лаборатория должна была производить необходимые исследования. Место для установки было выбрано на реке Колумбия в Хэнфорде (шт. Вашингтон). Первоначальное решение строить установку с гелиевым охлаждением было изменено в пользу более удобного водяного охлаждения. Основными задачами являлись проектирование решетки, загрузка и выгрузка, выбор материалов (в особенности с учетом коррозии и радиации), снабжение водой, управление и приборы, охрана здоровья, химический процесс разделения и проектирование разделительной установки. Были разработаны планы теоретических и технических исследований, а также подготовки кадров. Было достигнуто соглашение между фирмой Дюпон и Металлургической лабораторией о совместной работе.

ГЛАВА VIII

ПРОБЛЕМА ПЛУТОНИЯ С ЯНВАРЯ 1943 г. ДО ИЮНЯ 1945 г.

ВВЕДЕНИЕ

8.1. Необходимость ускорения проектирования и постройки плутониевой установки промышленного масштаба одновременно с проведением исследовательской работы неизбежно приводила к некоторой путанице и застою. Пришлось исследовать много конкурирующих процессов и доискиваться возможных причин неудачи, даже когда вероятность их серьезного значения была очень мала. Теперь, когда завод в Хэнфорде успешно производит плутоний, пожалуй, можно сказать, что большой процент результатов исследований, произведенных между концом 1942 и концом 1944 г., никогда не будет использован, по крайней мере, для поставленных вначале целей. Тем не менее, если бы Хэнфордский завод попал в затруднительное положение, то какое-нибудь из исследований, излишних в настоящее время, могло бы дать как раз нужную информацию для того, чтобы превратить неудачу в успех. Даже теперь невозможно утверждать, что будущие усовершенствования не зависят от результатов исследований, кажущихся столь маловажными сегодня.

8.2. Можно думать, что потребовалось бы томов тридцать для полного отчета по существенным научным результатам исследований, проведенных в связи с Металлургическим проектом. Работа производилась по каждому пункту исследовательской программы, приведенной в предыдущей главе. В настоящем отчете, очевидно, было бы совершенно невозможно дать нечто большее, чем краткий обзор всех этих исследований. Мы думаем, что этого было бы недостаточно, и что лучше дать общее описание установок, в которых осуществлялась цепная реакция и выделялся плутоний, в том виде, как они действуют теперь, с некоторыми отступлениями для рассмотрения более ранних конструкций.

ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ В КОТЛЕ

8.3. В главе I и других предыдущих главах мы дали краткое описание процесса деления, работы котла и химического отделения. Прежде, чем перейти к описанию самих установок для получения плутония, мы рассмотрим эти вопросы с несколько иной точки зрения.

8.4. Работа котла зависит от прохождения нейтронов сквозь вещество и характера столкновений нейтронов с встречающимися на их пути ядрами. Важнейшими типами столкновений являются следующие:

I. Столкновения, при которых нейтроны рассеиваются и теряют значительные количества энергии: (а) неупругие столкновения быстрых нейтронов с ядрами урана; (b) упругие столкновения быстрых нейтронов или нейтронов средних скоростей с легкими ядрами вещества замедлителя; в результате этих столкновений энергия нейтронов уменьшается до весьма малых (так называемых тепловых) значений.

II. Столкновения, при которых нейтроны поглощаются: (а) столкновения, которые приводят к делению ядер и дают продукты деления и добавочные нейтроны; (b) столкновения, которые приводят к образованию новых ядер, испытывающих затем радиоактивный распад (например ${}_{92}U^{239}$, превращающийся в ${}_{94}Pu^{239}$).

8.5. Только столкновения второго типа требуют дальнейшего рассмотрения. Из столкновений типа II (а), происходящих в котле, наиболее важными являются столкновения нейтронов с U-235, но нужно также учитывать деление U-238 быстрыми нейтронами и деление тепловыми нейтронами Pu-239. Столкновения типа II (b) — это, главным образом, столкновения между нейтронами и U-238. Они случаются с нейтронами любых энергий, но наиболее вероятны для нейтронов, энергии которых лежат в «резонансной» области, расположенной несколько выше тепловых энергий. Ход ядерных реакций при столкновениях типа II (b) может быть представлен следующим образом:

$${}_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{92}U^{239} + \gamma\text{-лучи}$$

$${}_{92}U^{239} \xrightarrow[\text{23 мин.}]{} {}_{93}Np^{239} + {}_{-1}e^{0}$$

$${}_{93}Np^{239} \xrightarrow[\text{2,3 дня}]{} {}_{94}Pu^{239} + {}_{-1}e^{0} + \gamma\text{-лучи}$$

8.6. Все иные процессы поглощения, не сопровождаемые делением, важны, главным образом, из-за потерь нейтронов; они происходят в замедлителе, в U-235, в охлаждающей жидкости, в имеющихся вначале примесях, в продуктах деления и даже в самом плутонии.

8.7. Так как целью цепной реакции является производство плутония, казалось, было бы желательным, чтобы весь излишек нейтронов был поглощен в U-238, и осталось бы только такое количество нейтронов, которого как раз достаточно, чтобы вызывать деление и, таким образом, поддерживать цепную реакцию. В действительности же тенденция нейтронов к поглощению преобладающим изотопом U-238 настолько велика, сравнительно с тенденцией вызывать деление в 140 раз более редкого U-235, что для получения цепной реакции главные усилия при проектировании должны были быть направлены на создание благоприятных условий для деления (путем применения замедлителя, подходящей решетки, материалов высокой чистоты и пр.).

ИСТОРИЯ ОДНОГО ПОКОЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ *)

8.8. Все котлы, сконструированные Металлургической лабораторией или при ее содействии, содержали в себе четыре вида материалов: металлический уран, замедлитель, охлаждающее вещество и вспомогательные материалы — трубки, защитные оболочки урана, стержни управления, примеси и пр. Начало реакции во всех котлах связано с блуждающими нейтронами, возникающими в результате спонтанного деления или под действием космических лучей.

8.9. Предположим, что котел может начать действовать при одновременном освобождении (в металлическом уране) N быстрых нейтронов. Большая часть этих частиц первоначально обладает энергиями, превышающими порог деления U-238. Однако, в силу того, что нейтроны испытывают неупругие столкновения с ураном и упругие столкновения с замедлителем, их энергия падает с течением времени ниже указанного порога. В частности, в котле с графитовым замедлителем нейтрон, вылетевший из урана в графит (средняя длина пробега в графите 2,5 *см*), испытает

*) См. рис. 4 на стр. 44.

в среднем около 200 упругих столкновений прежде, чем перейдет из графита обратно в уран. Так как при каждом таком столкновении нейтрон теряет, в среднем, около $^1/_8$ своей энергии, то нейтрон с начальной энергией в 1 MeV уменьшит свою энергию до тепловой (обычно принимаемой в 0,025 eV) значительно раньше, чем пройдет через графит. Конечно, имеется много нейтронов, поведение которых отступает от этого среднего, и быстрые нейтроны смогут все же вызвать некоторое число делений, в результате которых число наличных нейтронов слегка повысится. Это увеличение можно учесть, умножив первоначальное число нейтронов N на множитель ε — коэффициент размножения за счет быстрых нейтронов (the fast multiplication factor).

8.10. Так как средняя энергия имеющихся $N\varepsilon$ нейтронов продолжает падать, то неупругие соударения с ураном теряют свое значение, и уменьшение энергии происходит, в основном, в замедлителе. При достижении промежуточных значений энергии — интервала энергий «резонансного захвата» — вероятность поглощения без деления в U-238 становится значительной. Некоторое число нейтронов в этом интервале энергии будет поглощено независимо от выбора конструкции решетки. Влияние резонансного захвата можно учесть, умножив $N\varepsilon$ на число p (всегда меньшее единицы), выражающее вероятность того, что данный нейтрон с начальной энергией выше резонансной достигнет тепловой энергии без поглощения ураном 238. Таким образом, из первоначального числа N нейтронов с высокой энергией мы получили $N\varepsilon p$ нейтронов с тепловой энергией.

8.11. Как только нейтрон достиг тепловой энергии, вероятность дальнейшего замедления в результате соударений оказывается не большей, чем вероятность увеличения скорости. Следовательно, нейтроны будут обладать той же средней энергией до тех пор, пока они не будут поглощены. В интервале тепловых энергий вероятность поглощения нейтронов замедлителем, охладителем или вспомогательными материалами будет больше, чем в интервале более высоких значений энергии. Во всяком случае подсчитано, что если допустить, что все подобные нежелательные поглощения имеют место именно в этом интервале, то ошибка будет невелика. Введем множитель f — коэффициент использования тепловых нейтронов, определяющий вероятность того, что дан-

ный тепловой нейтрон будет поглощен ураном. Таким образом, из первоначального числа N быстрых нейтронов мы получаем число $N\varepsilon pf$ тепловых нейтронов, поглощаемых ураном.

8.12. Хотя существует несколько способов, которыми нормальная смесь изотопов урана может поглощать нейтроны, но, как может вспомнить читатель, в одной из предыдущих глав мы ввели величину η, представляющую собой число освобождаемых при делении нейтронов, приходящихся на каждый поглощенный ураном тепловой нейтрон, независимо от того, какими из этих способов осуществляется процесс. Если мы умножим число тепловых нейтронов, поглощенных ураном, $N\varepsilon pf$ на η, то получим число новых быстрых нейтронов, рожденных N первоначальными быстрыми нейтронами в течение их жизни. Если $N\varepsilon pf\eta > N$, то развитие цепной реакции возможно, так как число нейтронов в этом случае непрерывно возрастает. Очевидно, что $\varepsilon pf\eta = k_\infty$, где k_∞ — коэффициент размножения (см. главу IV).

8.13. Отметим, что до сих пор мы совершенно не упоминали о нейтронах, вылетающих из котла. Это было сделано сознательно, так как определенное выше значение k_∞ относится к бесконечной решетке. Исходя из известных значений k_∞ и того факта, что котлы работают, можно притти к заключению, что процент вылетающих нейтронов не слишком велик. Как видно из главы II, вылет нейтронов теряет свое относительное значение по мере увеличения размеров котла. Если приходится вводить в котел большое количество вспомогательных материалов (например, труб охладительной системы), то котлу необходимо придавать несколько большие размеры, чтобы компенсировать увеличение поглощения.

8.14. Итак, работа котла возможна благодаря применению устройства из решетки с замедлителем, уменьшающего энергии быстрых нейтронов до тепловых, и благодаря тому, что тепловые нейтроны получают возможность поглощаться ураном, что вызывает деление, воспроизводящее нейтроны с высокой энергией. Воспроизведению нейтронов в некоторой степени содействует влияние быстрых нейтронов, ему препятствует резонансное поглощение в процессе замедления, поглощение в графите и в других материалах и вылет нейтронов.



Один из цехов Хэнфор[illegible]о механического завода вблизи Паско (шт. Вашингтон).



Одна из производственных установок Клинтонского механического завода в Ок-Ридже (шт. Тенесси).

ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИИ НА КОЭФФИЦИЕНТ РАЗМНОЖЕНИЯ

8.15. Даже при той большой мощности, которой обладали котлы в Хэнфорде, на каждый миллион граммов заложенного в систему урана расходовалось в сутки лишь несколько граммов U-238 и U-235. Тем не менее, влияние этих изменений было весьма важно. По мере истощения U-235 концентрация плутония увеличивалась. К счастью, сам плутоний испытывает деления под действием тепловых нейтронов и, таким образом, стремится компенсировать, поскольку дело касается поддержания цепной реакции, уменьшение U-235. Однако, при работе котла получаются и другие продукты деления. Они обычно состоят из неустойчивых и сравнительно мало известных ядер, и вначале было невозможно предсказать, сколь велики будут те нежелательные влияния, которые могут оказать продукты деления на коэффициент размножения. Такие вредные влияния называются отравляющими. Несмотря на большое количество предварительных исследований продуктов деления, непредвиденный отравляющий эффект такого рода едва не заставил приостановить работы в Хэнфорде, с чем мы встретимся позднее.

ПРОДУКТЫ РЕАКЦИИ И ПРОБЛЕМА РАЗДЕЛЕНИЯ

8.16. В хэнфордской установке процесс производства плутония разделяется на две главных части: собственно получение его в котле и выделение его из блоков урана, в которых он образуется. Переходим к рассмотрению второй части — процессу выделения.

8.17. Блоки урана, кроме плутония, содержат также и другие элементы, образовавшиеся в результате деления U-235. Когда ядро U-235 делится, оно испускает один или более нейтронов и распадается на две сравнимых по величине части с общей массой 235 или немного меньше. Деление на равные в точности массы, повидимому, случается редко. Наиболее часто получаются осколки с массовыми числами между 134 и 144 и между 100 и 90. Таким образом, имеются две группы продуктов деления: тяжелая группа с массовыми числами в пределах, приблизительно, от 127 до 154 и легкая группа — с массовыми числами от 115 до 83. Эти продукты деления являются, в основном, неустойчивыми изотопами

приблизительно 30 известных элементов, расположенных в периодической таблице внутри указанного диапазона массовых чисел. Обычно они распадаются, последовательно испуская β-частицы и γ-лучи и превращаясь в известные нам устойчивые ядра. Периоды полураспада различных ядер, образующихся на промежуточных стадиях рассматриваемых превращений, лежат в пределах от долей секунды до одного года и более. Некоторые ядра обладают периодом полураспада порядка одного месяца. Около 20 элементов присутствуют в значительной концентрации. Наиболее распространенный из них составляет несколько меньше 10% общего количества.

8.18. Кроме радиоактивных продуктов деления в котле присутствуют радиоактивные U-239 и Np-239 (промежуточные продукты распада при образовании плутония). Радиоактивные продукты начинают накопляться с начала действия котла. В конечном счете скорость радиоактивного распада выравнивается с скоростью образования веществ, так что концентрации становятся постоянными. Например, число атомов U-239, образованных за 1 секунду, постоянно для котла, работающего на фиксированном уровне мощности. Согласно законам радиоактивного распада, число атомов U-239, распадающихся за 1 секунду, пропорционально наличному их количеству и, следовательно, возрастает в течение первых нескольких минут или часов после того, как котел был пущен в ход. По истечении некоторого времени столько же ядер будет распадаться за каждую секунду, сколько их образуется за ту же секунду. Концентрации других ядер будут приближаться к равновесным значениям точно таким же образом, причем они будут пропорциональны скорости образования ядра и периоду его полураспада. Концентрация устойчивых продуктов распада или продуктов распада, обладающих исключительно большим периодом полураспада (как например, плутоний), непрерывно возрастает в течение значительного промежутка времени. Когда котел перестает работать, радиоактивность, разумеется, остается, но интенсивность ее непрерывно падает. Изотопы с весьма малым периодом полураспада могут «выпасть из поля зрения» уже в течение нескольких минут или часов; другие — с большим периодом полураспада — могут сохранять заметную активность в течение дней или месяцев. Таким образом, концентрации различных

радиоактивных элементов в только что выключенном котле зависят от мощности, с которой работал котел, от длительности его работы и от давности прекращения его действия. Чем дольше работал котел, тем больше концентрация плутония, но, к сожалению, тем больше и концентрация продуктов деления с большой продолжительностью жизни. Чем дольше период «охлаждения», т. е. период между удалением материалов из котла и химической обработкой, тем меньше интенсивность излучения продуктов деления. Приходится искать компромисса между двумя факторами: с одной стороны желательностью длительной работы котла и продолжительного времени охлаждения и с другой — желательностью более ранней выдачи плутония.

8.19. Можно составить таблицы зависимости химических концентраций плутония и различных продуктов деления от мощности котла, длительности его работы и периода охлаждения. Период полураспада U-239 настолько мал, что его концентрация становится исчезающе малой уже вскоре после прекращения действия котла. Нептуний довольно скоро превращается в плутоний. Конечно, общий вес продуктов деления — устойчивых и неустойчивых — остается практически постоянным после выключения котла. В условиях работы в Клинтоне и Хэнфорде максимальная концентрация плутония получается столь малой, что это существенно увеличивает трудность химического разделения.

ВЫБОР ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ

8.20. Задача заключается в химическом выделении плутония с дневной производительностью, скажем, в несколько граммов из нескольких тысяч граммов урана, загрязненного большими количествами опасно радиоактивных продуктов деления, содержащих 20 различных элементов. Эта задача особенно трудна, так как требования, предъявляемые к плутонию в отношении чистоты, очень высоки.

8.21. Были испытаны четыре способа химического разделения: испарение, адсорбция, извлечение растворителем и осаждение. Несмотря на то, что по способам адсорбции и извлечения растворителем была проделана весьма большая работа и эти способы могли найти себе применение как в главном процессе,

так и при регенерации отходов, завод в Хэнфорде был рассчитан на процесс осаждения.

8.22. *) В химии радиоактивных веществ является обычным использование явлений совместного осаждения, т. е. осаждения малых концентраций одного элемента вместе с «носителем» — осадком какого-либо другого элемента. Это явление и было применено к отделению плутония. Ранние работы по химии плутония, ограниченные по необходимости ничтожными количествами этого вещества, в широкой мере использовали реакции осаждения, из которых могли делаться выводы о растворимости соединений плутония. Поэтому естественно, что способ осаждения был наиболее разработан в то время, когда начинали проектировать завод. Можно было предполагать, что если бы удалось предпринять исследование процессов разделения частично эмпирическим путем, то было бы меньше риска в развертывании работ по процессу осаждения, чем, например, по процессу, включающему в себя лишь реакции в области твердых фаз. Кроме того, процессы осаждения могут быть разбиты на ряд повторных операций (циклов); в результате этого уменьшается число различных деталей оборудования, которые необходимо запроектировать, и возможно значительное изменение процесса без изменения оборудования. Таким образом, если бы проект основного завода был рассчитан на один метод, то окончательный выбор другого метода не привел бы ни к каким затруднениям.

8.23. Большая часть процессов осаждения, подвергшихся серьезному обсуждению, была основана на использовании чередования (IV) и (VI) состояний окисления плутония. Такие процессы включают в себя осаждение плутония (IV) с некоторой смесью в качестве его носителя, затем растворение осадка, окисление плутония до состояния (VI) и вторичное осаждение несущего соединения, в то время как плутоний (VI) остается в растворе. Продукты деления, для которых эти соединения не являются носителями, остаются в растворе, в то время как плутоний (IV) выпадает из него. Продукты деления, выносимые носителями, удаляются в то время, когда плутоний находится в состоянии (VI). Последовательные циклы окисления и восстановления применяются

*) Параграфы 8.22—26 цитируют, или перефразируют, общий отчет Металлургической лаборатории, составленный весной 1945 г.

до тех пор, пока не будет достигнута требуемая степень очистки. (Процесс удаления продуктов деления назван «очисткой», и степень чистоты измеряется изменением радиоактивности материала).

КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ

8.24. Различные типы процесса можно сочетать или комбинировать друг с другом. При этом можно получить некоторые преимущества, так как один тип процесса может быть дополнением к другому. Например, процесс, который дает хорошую очистку, может с успехом комбинироваться с таким процессом, который, будучи неэффективным в отношении очистки, весьма эффективен в отношении отделения от урана.

8.25. К тому времени, как возникла необходимость в выборе основного процесса для проектировавшейся установки в Хэнфорде (июль 1943 г.), этот выбор по вышеуказанным мотивам был ограничен процессами осаждения и явно колебался между двумя вариантами. Однако, окончательно выбранный процесс в действительности представлял собой комбинацию обоих.

8.26. Успех процесса разделения в Хэнфорде превзошел все ожидания. Хорошая очистка и высокий выход, а также относительная легкость ведения процесса, в полной мере демонстрируют всю проницательность, проявленную при выборе его. Выбор базировался на знании химии плутония, приобретенном химиками, имевшими в своем распоряжении меньше одного миллиграмма плутония. Основная цель — иметь пригодный на практике и эффективный процесс к моменту, когда хэнфордские котлы начнут вырабатывать плутоний, — была достигнута, хотя дальнейшие усовершенствования могут сделать процесс устарелым.

ЛАБОРАТОРИЯ В АРГОННЕ

8.27. Аргоннская лаборатория была построена в начале 1943 г. в окрестностях Чикаго. Участок земли, первоначально предназначенный для опытного завода, позднее стал рассматриваться как слишком близкий к городу и был использован для реконструкции так называемого Вест-Стэндского котла, первоначально построенного на земельном участке Чикагского университета и бывшего заведомо безопасным. Под руководством Э. Ферми и его коллег—

Г. Л. Андерсона, В. Г. Цинна, Дж. Вейля и других — этот котел служил прототипом аггрегата для изучения термической устойчивости, управления, приборов, экранирования, а также являлся источником получения нейтронов для испытания материалов и исследований в области нейтронной физики. Кроме того, он зарекомендовал себя в качестве тренировочной школы для обслуживающего персонала. Сравнительно недавно здесь же был построен и котел с тяжелой водой (см. ниже).

8.28. Первый котел в Аргонне (урано-графитовый) не нуждается в детальном описании. Материалы для него и строение решетки почти те же, как и в первоначальном Вест-Стэндском котле. Котел имеет форму куба, окружен экраном, а приборы управления и предохранительные устройства похожи на применявшиеся позднее в Клинтоне. Охлаждения котел не имеет и, как правило, работает на мощности всего лишь в несколько киловатт. Иногда, впрочем, он работал на большой мощности, но в течение весьма малых промежутков времени. Принимая во внимание, что этот котел является результатом перестройки первого, вообще когда-либо осуществленного, котла, можно только удивляться, что он непрерывно проработал больше двух лет без сколько-нибудь значительных неполадок.

8.29. Одним из наиболее ценных применений котла в Аргонне было измерение поперечных сечений поглощения нейтронов в большом числе различных элементов, которые могли найти применение при строительстве котла, или могли присутствовать в материалах котла, как примеси. Определения производились путем наблюдения тех изменений в положении управляющих стержней, которые необходимы для того, чтобы получить $k_{\text{эфф.}}=1,00$, когда изучаемые вещества помещены в определенных точках котла. Полученные результаты обычно выражались через «коэффициент опасности» изучаемого элемента.

8.30. Отверстие в верхней части котла дает весьма однородный пучок тепловых нейтронов, который можно использовать для экспериментов с экспоненциальным котлом, прямых измерений поперечных сечений поглощения, исследований с помощью камеры Вильсона и т. д.

8.31. Интересное явление представляет собой образование потока «холодных» нейтронов. Если между верхней поверхностью

котла и точкой наблюдения, находящейся в нескольких ярдах выше этой поверхности, расположить достаточное количество графита, то, как обнаружилось, распределение по энергиям нейтронов соответствует температуре гораздо более низкой, чем температура графита. Следует предположить, что кристаллический графит лучше пропускает наиболее медлённые («холодные») нейтроны, квантово-механическая длина волны которых велика по сравнению с расстоянием между соседними плоскостями кристаллической решетки графита.

8.32. Сравнительно недавно в Аргоннской лаборатории был построен котел, где в качестве замедлителя применялась тяжелая вода. Пучок нейтронов очень высокой интенсивности, создаваемый этим котлом, оказался весьма подходящим для изучения «нейтронной оптики», например, для изучения отражения и преломления нейтронных пучков графитом.

8.33. Постоянной целью Аргоннской лаборатории было углубление понимания ядерных процессов в уране, нептунии и плутонии. Производились также повторные уточнения значений поперечных сечений U-238, U-235 и Pu-239 для деления под действием тепловых нейтронов, вероятности поглощения нейтронов без деления каждым из этих ядер и числа нейтронов, испускаемых на деление.

УСТАНОВКА В КЛИНТОНЕ

8.34. В главе VI мы упоминали о проекте «опытной» установки для производства плутония, которая должна была быть построена в Клинтоне (штат Тенесси). К январю 1943 г. проектирование этой установки сильно продвинулось вперед, и вскоре после этого началось строительство. Директором клинтонских лабораторий был назначен М. Д. Уитекер. Проект опытной установки был выработан совместно фирмой Дюпон и Металлургической лабораторией. Постройка была выполнена фирмой Дюпон. Установка эксплоатировалась Чикагским университетом, как часть Металлургического проекта.

8.35. Клинтонская установка должна была главным образом производить некоторое количество плутония и служить в качестве опытной установки по химическому разделению. Исследовательские работы в Клинтоне относились, главным образом, к химии и

к биологическому действию излучений. Была предусмотрена большая лаборатория для химических анализов, для изыскания способов очистки, изучения продуктов деления, для разработки в полузаводских масштабах процессов выделения и очистки и т. д. Позднее была построена «горячая лаборатория», т. е. лаборатория высоко-радиоактивных веществ с управлением на расстоянии. Имелись также инструментальная мастерская и лаборатория, использовавшиеся весьма активно. Кроме того, были созданы условия для клинической и экспериментальной работы секции охраны здоровья, оказавшейся весьма деятельной. Имелась еще небольшая физическая лаборатория, где производились некоторые важные работы с применением нейтронов большей интенсивности, чем те, которые были в распоряжении Аргоннской лаборатории. Главными сооружениями, построенными на участке Клинтонской лаборатории, были котел и установка для химического разделения, вкратце описанные ниже.

КЛИНТОНСКИЙ КОТЕЛ

8.36. Для любого непрерывно действующего котла эффективный коэффициент размножения k должен равняться единице при любой мощности котла. Наилучшее значение k_{∞}, наблюдавшееся в урано-графитовой решетке, не может быть достигнуто в котле на практике, вследствие ухода нейтронов через поверхность, влияния системы охлаждения, цилиндрических каналов для урана и защитного покрытия урана и других второстепенных факторов. Исходя из воздушного охлаждения и максимальной допустимой температуры поверхности урана, размеры котла необходимо было выбрать так, чтобы он мог давать 1000 kW. Эффективное значение k должно падать с повышением температуры, однако, не настолько, чтобы влияние температуры было определяющим фактором. Хотя идеальной геометрической формой для котла был бы шар, но из практических соображений рекомендуется форма прямоугольного блока.

8.37. Клинтонский котел представляет собой графитовый куб, имеющий внутри горизонтальные каналы, заполненные ураном. Уран имеет форму металлических цилиндров, защищенных газонепроницаемыми алюминиевыми оболочками. Урановые цилиндрические стержни (или блоки) могут вдвигаться в каналы, причем в



Наверху: Здание Манхэттенского округа в Ок-Ридже (шт. Тенесси). *Внизу*: Хэнфорд, вблизи Паско (шт. Вашингтон), который был населён тысячами рабочих, строивших установки Хэнфордского механического завода. Теперь он пуст.



Перспективный план Хэнфордского механического завода вблизи Паско (шт. Вашингтон).

каналах оставлены зазоры для потока охлаждающего воздуха и для выталкивания урановых стержней через заднюю стену котла, когда они готовы к переработке. Помимо этих каналов в котле имеются еще другие сквозные отверстия — для стержней управления, измерительных приборов и пр.

8.38. Клинтонский котел был значительно больше, чем первый котел в Чикаго (см. главу VI). Но более существенны, чем его увеличенные размеры, были система охлаждения, более массивные экранирующие щиты и приспособления для смены урановых стержней. Производительность клинтонской установки соответствовала мощности котла в 1000 kW.

8.39. Инструментальная часть и приборы управления в основных чертах тождественны с соответствующим оборудованием первого котла. Интенсивность нейтронов в котле измеряется ионизационной камерой с BF_3 и регулируется с помощью стержней из бористой стали, которые могут вдвигаться и выдвигаться из котла, благодаря чему изменяется та доля общего числа нейтронов, которая вызывает деление.

8.40. Несмотря на внушительное оснащение множеством инструментов и предохранительных приспособлений, наиболее поразительная черта этого котла — простота в обращении с ним. Большую часть времени обслуживающему персоналу нечего делать, кроме записи показаний различных измерительных приборов.

РАЗДЕЛИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

8.41. Здесь, как и в Хэнфорде, для процессов, связанных с плутонием, применяется управление на расстоянии, позади толстых экранирующих щитов. Оборудование для операций разделения заключено в ряд смежных камер, окруженных массивными бетонными стенами. Эти камеры образуют непрерывную структуру (каньон), длиной около 100 футов, на две трети зарытую в землю. К каньону примыкают помещения для управления, лаборатории для анализа, а также лаборатория для дальнейшей очистки плутония, после того как он освобожден от примесей до состояния относительной безопасности.

8.42. Урановые стержни, применявшиеся в работе котла, переносятся под водой к первой из камер и затем растворяются.

Дальнейшие операции производятся путем перекачивания растворов или шлама из одной камеры или центрифуги в другие.

КАЧЕСТВО РАБОТЫ КЛИНТОНСКОГО КОТЛА

8.43. Клинтонский котел начал работать 4 ноября 1943 г. и в течение нескольких дней его мощность достигла 500 kW при максимальной температуре поверхностей урановых стержней в 110° С. Улучшение циркуляции воздуха и повышение максимальной температуры поверхности урана до 150° С подняли мощность, приблизительно, до 800 kW; на этом уровне она и держалась до весны 1944 года. После этого было изменено расположение урана с таким расчетом, чтобы выравнять распределение мощности в котле путем уменьшения количества металла вблизи центра котла, по сравнению с более далекими от центра частями; это позволяет увеличить среднюю мощность котла без местных чрезмерных повышений температуры. В то же время была повышена герметичность оболочек урановых стержней, что позволило котлу работать при более высокой температуре. В результате, в мае 1944 г. была достигнута мощность в 1800 kW, увеличенная в дальнейшем еще более — после установки в июне лучших вентиляторов.

8.44. Таким образом, качество работы котла в июне 1944 г. значительно превысило все ожидания. В отношении легкости управления, устойчивости работы и отсутствия опасных излучений котел оказался в высшей степени удовлетворительным. Было лишь немного неполадок, которые можно отнести за счет ошибок в конструкции или в постройке.

8.45. Сам по себе котел был прост как по принципу действия, так и на практике. Не так обстояло дело с установкой по выделению плутония. Переход от первого котла с цепной реакцией к клинтонскому котлу можно было с достаточным основанием предсказать заранее. Гораздо более значительный переход по величине и по неопределенности необходимо было сделать для процесса разделения, так как клинтонская разделительная установка проектировалась на базе экспериментов, при которых применялись количества плутония, измерявшиеся микрограммами.

8.46. Тем не менее, процесс разделения был осуществлен! Первая партия урановых стержней из котла поступила на разделительную установку 20 декабря 1943 г. К концу января 1944 г.

уран из котла поступал на разделительную установку в количестве ⅓ тонны в сутки. К 1 февраля 1944 г. было выдано 190 *мг* плутония, а к 1 марта того же года было выдано уже несколько граммов. Эффективность регенерации отходов с самого начала была равна приблизительно 50%, а в июне 1944 г. она уже составляла от 80 до 90%.

8.47. В течение всего этого периода в Клинтоне большая группа химиков работала над улучшением процесса и проектировала процесс для Хэнфорда. Хэнфордская проблема отличалась от клинтонской тем, что там ожидались гораздо большие концентрации плутония. Кроме того, хотя химиков и можно было поздравить с успехом на клинтонской установке, но процесс был сложным и дорогим. Приходилось весьма и весьма добиваться улучшений в выходе или очистке или общего упрощения процесса разделения.

8.48. Помимо испытания котла и установки для выделения плутония, а также добычи нескольких граммов плутония для экспериментов в Чикаго, Клинтоне и в других местах, Клинтонские лаборатории оказались неоценимыми, как учебный и испытательный центр для Хэнфорда, для медицинских экспериментов, для изучения котла и процессов очистки, для изучения физики и химии плутония и продуктов деления.

8.49. В качестве типичных проблем, которые разрешались здесь и в Чикаго, можно указать следующие (перечисленные в одном из обычных отчетов, относящемся к маю 1944 г.):

Проблемы, завершенные в течение мая 1944 г. Поиски нового окислителя, влияние излучения на воду и водные растворы, растворимость перекиси плутония, соединения плутония, пригодные для транспортировки, распределение продуктов деления в растворах при заводском процессе, предварительный проект процесса выделения при помощи адсорбции, разработка метода адсорбции в полузаводских условиях, завершение проекта адсорбционного метода.

Новые проблемы, намеченные в мае 1944 г. Новый метод анализа плутония, влияние радиоактивного излучения на графит, улучшение выхода, исследования нового котла, регенерация урановых отходов, обрызгивание отходящих газов, удаление отходов активных растворов, оросительное охлаждение котла X, програм-

ма обучения количественным анализам, стандартизация методов количественного анализа, разработка методов количественного анализа, экранированная аппаратура для контрольных анализов процесса, эксперименты с камерой Вильсона, α-частицы, испускаемые ураном-235, радиальное распределение плутония, диффракция нейтронов.

ХЭНФОРДСКИЙ ЗАВОД

8.50. Рассказ о постройке «Хэнфордского механического завода» (Hanford Engineer Works) выходит за рамки данного отчета, но будем надеяться, что полная история этого замечательного предприятия и его компаньона — «Клинтонского механического завода» (Clinton Engineer Works) — будет когда-либо опубликована. Местность в Хэнфорде была обследована уполномоченными генерала Гроувза и фирмы Дюпон в конце 1942 года, причем использование этого земельного участка было одобрено ген. Гроувзом после того, как он проинспектировал его лично. Участок находился на западном берегу реки Колумбия, в центре штата Вашингтон, к северу от Паско. В первые же месяцы 1943 года правительством была приобретена (на условиях аренды или покупки) полоса земли в этом районе площадью 200 кв. миль; сделка состоялась при посредстве Отдела недвижимостей Управления главного инженера. В конечном счете под правительственный контроль отошло около тысячи квадратных миль земли. В период приобретения земли там было лишь несколько ферм и две маленькие деревушки, Хэнфорд и Ричлэнд, окруженные покрытыми кустарником равнинами и бесплодными холмами.

6 апреля 1943 г. был выделен участок для строительного поселка в Хэнфорде. В 1944 году, в разгар работ, этот поселок разросся уже в город с населением в 60 000 жителей — четвертый по населенности город во всем штате. В настоящее время, впрочем, этот поселок почти безлюден, так как армия рабочих размещена в Ричлэнде.

8.51. Работы по постройке первого хэнфордского производственного котла начались 7 июня 1943 г., а действовать он начал в сентябре 1944 г. Первоначально предполагалось строить на участке пять котлов, но строить начали лишь три из них. Кро-

ме котлов, там имеются, конечно, установки для отделения плутония, насосные станции и водоочистительные устройства. Имеется также один котел низкой мощности для испытания материалов. Ради безопасности не только самые котлы отделены друг от друга большими пространствами(в несколько миль), но и разделительные установки расположены вдали от котлов и друг от друга. Летом 1945 года все три котла были уже в действии.

ЗАЩИТА УРАНОВЫХ СТЕРЖНЕЙ И КОРРОЗИЯ

8.52. Никто из живших в Хэнфорде в период проектирования и постройки завода не забудет проблемы защиты, т. е. проблемы герметической изоляции урановых стержней, заключаемых в защитные металлические оболочки. Во время периодических поездок в Чикаго пишущий эти строки мог всегда сразу бегло оценить состояние вопроса защиты урановых стержней по атмосфере уныния или радости, царившей во всей лаборатории. Это было поистине непростое дело — найти оболочку, которая защищала бы уран от коррозии под действием воды, не допускала бы проникновения в воду продуктов деления, передавала бы тепло от урана воде и не поглощала бы слишком много нейтронов. Тем не менее, порча лишь одной защитной оболочки могла привести к необходимости остановить весь котел.

8.53. Попытки удовлетворить поставленным строгим условиям вылились в экспериментальную работу над гальванопластическими процессами, над процессами покрытия путем погружения в горячий электролит, над процессами покрытия путем цементации, над антикоррозийными сплавами урана и над процессами механического покрытия защитными оболочками. Оболочки из тонкого алюминия были допустимы с точки зрения ядерной физики и уже на ранней стадии были признаны наилучшим решением вопроса. Но оказалось очень трудным получить однородный тепловой контакт между ураном и окружающим его алюминием и осуществить газонепроницаемость оболочки. Разработку различных методов пришлось проводить до последней минуты, и даже за несколько недель до срока загрузки котла урановыми стержнями не было никакой уверенности в том, что хоть один из разрабатываемых методов окажется удовлетворительным. Последнее небольшое, но очень важное, видоизменение выбранного спо-

соба защиты было применено в октябре 1944 г., уже после того, как первый котел начал пробную работу. Летом 1945 г. не было зарегистрировано ни одной неполадки в работе защитной оболочки.

СОСТОЯНИЕ ХЭНФОРДСКИХ УСТАНОВОК В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

8.54. В течение осени 1944 года и в первые месяцы 1945 года были закончены и пущены в эксплоатацию второй и третий котлы в Хэнфорде, равно как и добавочные установки по химическому разделению. Разумеется, были затруднения и здесь, однако, все страхи по поводу возможности порчи защитных оболочек, образования налетов на водопроводных трубах или влияния излучений на химические процессы оказались напрасными. Уже к началу лета 1945 года котлы работали на проектной мощности, производили плутоний и нагревали воду реки Колумбии *). Химические установки отделяли плутоний от урана и от продуктов деления даже с большей эффективностью, чем это предполагалось. Продукция выдавалась в окончательном виде. Каковы были возможности использования продукции — об этом рассказано в главе XII.

РАБОТА С ТЯЖЕЛОЙ ВОДОЙ

8.55. В предыдущих главах уже упоминалось о преимуществах тяжелой воды в качестве замедлителя. Тяжелая вода лучше, чем графит, замедляет нейтроны и меньше, чем графит, их поглощает. Поэтому возможно построить аггрегат цепной реакции с тяжелой водой и ураном и таким образом достигнуть намного большего значения коэффициента размножения k и меньших размеров котла, чем это возможно с графитом. Но для этого нужно иметь тяжелую воду.

8.56. Весной 1943 г. в Металлургической лаборатории было решено усилить экспериментальную и вычислительную работу, посвященную котлу с тяжелой водой. Для этой цели была образована комиссия под председательством Э. Вигнера; группа под руководством Г. К. Вернона переехала из Колумбии в Чикаго.

*) Фактически повышение температуры столь незначительно, что нельзя ожидать никакого влияния этого повышения на рыбу. Для полной уверенности был проведен ряд экспериментов, которые оправдали ожидания.

Общее руководство было предложено Г. Д. Смиту, только что ставшему заместителем директора Лаборатории.

8.57. Первой задачей группы было рассмотреть, как лучше всего использовать тяжелую воду, чтобы обеспечить полный успех Металлургического проекта, принимая во внимание уже утвержденную ограниченную программу производства тяжелой воды.

8.58. Выяснилось, что производство воды по этой программе столь низко, что потребовалось бы два года для выработки тяжелой воды в количестве, достаточном для котла таких размеров, которые обеспечили бы производство нужных количеств плутония. С другой стороны, тяжелой воды могло оказаться достаточно для осуществления малого, «лабораторного» котла, который позволил бы получить весьма ценные данные. Во всяком случае, летом 1943 г. царила столь большая неопределенность в отношении длительности войны и успеха в других частях Проекта ДСМ, что полное изучение возможностей котлов с тяжелой водой казалось желательным — следовало или увеличить производственную программу или построить сравнительно небольшой котел для экспериментальных целей. В течение лета 1943 г. шло интенсивное изучение вопроса, но в ноябре было решено программу урезать, а постройку — ограничить котлом на 250 kW, который должен был быть расположен в Аргонне.

АРГОННСКИЙ КОТЕЛ С ТЯЖЕЛОЙ ВОДОЙ.

8.59. Быть может самой поразительной чертой котла с ураном и тяжелой водой являются малые его размеры. Даже вместе с окружающим бетонным экраном он мал сравнительно с урано-графитовыми котлами.

8.60. К 15 мая 1944 г. аргоннский котел с ураном и тяжелой водой был готов к испытаниям. Когда урановые стержни были уже на месте, обнаружилось, что цепная реакция в котле стала развиваться уже при $^{3}/_{5}$ номинального количества тяжелой воды. Способность к реакции у котла настолько превзошла все ожидания, что, если бы был добавлен весь остаток тяжелой воды, то котел вышел бы из под контроля системы управления. Чтобы справиться с этой неожиданной и приятной ситуацией, часть урановых стержней была удалена и были добавлены новые управляющие стержни.

8.61. После таких изменений оказалось возможным наполнить резервуар до запланированного уровня. 4 июля 1944 г. В. Г. Цинн сообщил, что котел работал удовлетворительно при 190 kW, а 8 августа того же года он известил о работе при 300 kW.

8.62. В целом, характеристики этого котла мало отличаются от характеристик графитовых котлов соответствующих размеров. Для достижения состояния равновесия котлу необходимо несколько часов. Он обнаруживает малые (меньше 1%), но внезапные флуктуации мощности, вызванные, вероятно, пузырьками в воде. Его нельзя сразу полностью или быстро выключить, как графитовый котел, вследствие того, что запаздывающие γ-лучи освобождают из тяжелой воды добавочные нейтроны. Как и было предсказано, плотность нейтронов в центре котла велика. Экраны, щиты, управление, система охлаждения и пр. работали удовлетворительно.

СЕКЦИЯ ОХРАНЫ ЗДОРОВЬЯ

8.63. Главная цель группы охраны здоровья состояла в обеспечении того, чтобы ни один из работников не пострадал серьезно от специфических опасностей предприятия. В историях болезни лиц, серьезно или смертельно пострадавших от излучения, положительно не было нужды. Успех секции охраны здоровья в разрешении этих задач был поразителен. Даже среди исследовательской группы, где осуществление профилактических мероприятий наиболее трудно, случаи хотя бы временных тяжелых поражений были чрезвычайно редки. Мероприятия по охране труда, применявшиеся во время сооружения и эксплоатации, столь значительны, что число несчастных случаев с персоналом в домашней обстановке и при автомобильных катастрофах было гораздо больше, чем при работе на производстве.

8.64. Чтобы достигнуть своих целей, группа охраны здоровья работала в трех главных направлениях:

(1) Обследование состояния здоровья перед наймом на работу и частые повторные осмотры, особенно тех лиц, которые могли подвергаться действию излучений.

(2) Установление безвредных для организма доз излучения и разработка приборов для измерения интенсивности и длительности действия излучений на персонал; советы по ограждению от

излучений и пр.; непрерывное измерение интенсивности радиации в различных местах установки; измерение заражения излучениями одежды, лабораторных столов, отработанной воды, воздуха и пр.

(3) Проведение исследований по влиянию на людей и животных различных типов излучения и по влиянию заглатывания и вдыхания различных радиоактивных или токсических материалов, как например, продуктов деления, урана и плутония.

РЕГУЛЯРНЫЕ ООМОТРЫ

8.65. В качестве главного критерия того, подвергалось ли данное лицо избыточному облучению, применялся подсчет белых кровяных шариков. Наблюдался целый ряд случаев ненормально низкого их числа, и это ставилось в связь со степенью избыточности экспозиции. Лица, особенно, пострадавшие от влияния излучений, переводились на другую работу или получали кратковременный отпуск; постоянные болезненные явления не были обнаружены ни у кого.

8.66. В то же время обнаружилось, что подсчет белых кровяных шариков не является вполне надежным критерием. Опыты над животными показали, что серьезный ущерб здоровью может быть нанесен еще до того, как подсчет белых кровяных шариков укажет на опасность. Поэтому были поставлены более детально разработанные опыты по анализу крови над специально подобранными индивидуумами и животными в надежде найти средство для более раннего прогноза грозящей опасности для здоровья.

АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

8.67. На секции охраны здоровья лежала главная ответственность за конструирование карманных приборов для определения экспозиции персонала при облучении. Первым из таких приборов был простой электроскоп, размерами и формой напоминавший вечное перо. Такие приборы электростатически заряжались каждое утро, а их показания проверялись в конце дня. Степень их разрядки указывала на общую величину ионизующего излучения, действию которого они подвергались. К сожалению, ни один из них не оказался достаточно надежным, хотя ошибка при отсчете показаний почти всегда была в нужную сторону, а именно,

в сторону преувеличения экспозиции. В первоначальный период была установлена практика — выдавать по два карманных прибора каждому, кто вступал в опасную зону. Показания записывались в момент выдачи прибора и при его возвращении. Самые приборы непрерывно, хотя и медленно, совершенствовались. Позднее секция охраны здоровья ввела в употребление «жетоны» из пленки — маленькие кусочки пленки, которые периодически проявлялись и исследовались на почернение от радиации. Эти приборы для отдельных лиц были дополнительной и, вероятно, излишней предосторожностью. Постоянных экранированных укрытий одной лишь капитальной защиты было вполне достаточно. Ее действие подвергалось частой проверке при помощи стационарных или переносных приборов.

8.68. В части конструирования и применения различных приборов секция охраны здоровья работала в сотрудничестве с секцией физики. Имелся прибор, называвшийся «Снизи», — для измерения концентрации радиоактивной пыли в воздухе и «Плутон» — для измерения заражения α-излучающими веществами (обычно плутонием) лабораторных столов и другого оборудования. Применялись также приборы для проверки зараженности лабораторной одежды до и после стирки. У выходных дверей некоторых лабораторий висели приборы, дававшие тревожные сигналы, если мимо них проходил кто-либо, чья одежда, кожа или волосы заражены излучениями. Кроме того, производились регулярные осмотры лабораторных помещений.

8.69. Одно из производившихся исследований относилось к метеорологии. Было важно узнать, распространяются ли в Клинтоне и в Хэнфорде вместе с отходящими газами радиоактивные продукты деления в опасных концентрациях. Так как поведение этих газов сильно зависит от атмосферных условий, то в течение многих месяцев производились соответствующие исследования в местах расположения обоих заводов, после чего были установлены определенные требования к обработке отходящих газов.

МЕДИЦИНСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

8.70. Так как и объем и разнообразие видов излучения в этом предприятии совершенно беспрецедентны, то были применены все возможные меры предосторожности. Однако, для определения

достаточности этих предосторожностей не было никаких надежных средств. Необходимо было сколь возможно пополнить прежние знания. Для этой цели был намечен и проведен ряд опытов над животными в трех главных направлениях по обширной программе: (1) облучение нейтронами и α-, β- и γ- излучением, (2) введение внутрь организма урана, плутония и продуктов деления, (3) вдыхание урана, плутония и продуктов деления. Эти эксперименты проводились в Чикаго, в Клинтоне и в Калифорнийском университете, главным образом, д-рами Колом и Гамильтоном под общим руководством д-ра Стоуна. Были получены многочисленные и ценные результаты.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ

8.71. Как объем книги, так и ограничения, налагаемые секретностью, не допускают детализации отчета по работе лабораторий и заводов в отношении выработки плутония.

8.72. Для работы установки основными являются два типа поглощения нейтронов: (1) поглощение ураном-235, приводящее к делению, являющееся источником новых нейтронов, и поддерживающее цепную реакцию, (2) поглощение ураном-238, приводящее к образованию плутония.

8.73. Ход ядерной цепной реакции в гетерогенном котле с графитовым замедлителем можно описать, проследив одно поколение нейтронов. Первоначальное число быстрых нейтронов немного увеличивается благодаря делениям на быстрых нейтронах, затем уменьшается ввиду резонансного поглощения в U-238 и, далее, еще уменьшается вследствие поглощения тепловых нейтронов в графите и в других материалах, а также вследствие вылета. Оставшиеся медленные нейтроны вызывают деления в U-235, которые в свою очередь создают новое поколение быстрых нейтронов, подобное предыдущему.

8.74. Окончательный продукт — плутоний — должен быть отделен с помощью химических процессов от сравнимого с ним количества продуктов деления и от много большего количества урана. Процесс отделения, выбранный из нескольких возможных, состоит из ряда реакций, включающих осаждение с носителями, растворение, окисление и восстановление.

8.75. Цепная реакция изучалась на котле малой мощности в Аргоннской лаборатории с начала 1943 года. Как цепная реакция, так и химические процессы отделения, исследовались также в Клинтонской лаборатории, начиная с ноября 1943 года, причем там было получено заметное количество плутония.

8.76. Постройка главной промышленной установки в Хэнфорде (шт. Вашингтон) началась в 1943 году, а первый большой котел был введен в действие в сентябре 1944 г. С лета 1945 г. работала уже вся установка, причем все котлы и химико-разделительные устройства работали лучше, чем это можно было предвидеть.

8.77. Многочисленные исследования были проведены по применению тяжелой воды в качестве замедлителя; в Аргоннской лаборатории был построен экспериментальный котел с тяжелой водой в качестве замедлителя. От планов постройки производственной установки, применяющей тяжелую воду, пришлось отказаться.

8.78. Секция охраны здоровья действовала по трем главным направлениям: (1) медицинский осмотр персонала, (2) советы, касающиеся опасности облучения, и постоянный контроль в рабочих условиях и (3) исследования влияния излучений. Тщательное планирование и исчерпывающая исследовательская работа этой секции привели к выдающимся достижениям в области охраны здоровья в Хэнфорде и в других местах.

ГЛАВА IX

ОБЩЕЕ РАССМОТРЕНИЕ ВОПРОСА О РАЗДЕЛЕНИИ ИЗОТОПОВ

9.1. Возможность изготовления атомной бомбы из U-235 была установлена до того, как был открыт плутоний. Так как давно было ясно, что разделение изотопов урана явится прямым и главным этапом в производстве такой бомбы, то методы разделения изотопов урана были предметом тщательных исследований в течение по меньшей мере шести лет. В то же время, как только было установлено, что выделение дейтерия тоже имеет большое значение, стал изучаться вопрос о разделении не только изотопов урана, но и изотопов водорода. В настоящей главе рассматриваются общие проблемы разделения изотопов. Последующие главы представляют собой подробное описание отдельных процессов.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ

9.2. По определению, изотопы элемента отличаются своими массами, но не химическими свойствами. Точнее говоря, хотя массы ядер изотопов и их строение различны, заряды ядер одинаковы, и поэтому наружные электронные оболочки практически тождественны. Таким образом, для большинства практических целей изотопы какого-либо элемента можно разделить только при помощи процессов, зависящих от массы ядра.

9.3. Хорошо известно, что молекулы газа или жидкости находятся в непрерывном движении и что их средняя кинетическая энергия зависит только от температуры и не зависит от химических свойств молекулы. Таким образом в газе, состоящем из смеси двух изотопов, средняя кинетическая энергия легких и тяжелых молекул будет одинакова. Так как кинетическая энергия молекулы равна $\frac{1}{2} mv^2$, где m — масса и v — скорость молекулы,

то очевидно, что, в среднем, скорость более легкой молекулы должна быть больше скорости более тяжелой. Поэтому, по крайней мере в принципе, любой процесс, зависящий от средней скорости молекул, можно использовать для разделения изотопов. К сожалению, средняя скорость обратно пропорциональна корню квадратному из массы, так что для газообразных соединений изотопов урана это различие очень мало. К тому же, хотя средние скорости различаются, интервалы скоростей в значительной мере перекрываются. Так, в случае газообразного шестифтористого урана более 49% легких молекул имеют такие же малые скорости, как и 50% тяжелых молекул.

9.4. Очевидно, нет практически осуществимого способа приложения механических сил непосредственно к отдельным молекулам; их нельзя толкать палкой или тянуть веревкой. Однако, на них воздействуют гравитационные или, если молекулы ионизованы, электрические и магнитные поля. Гравитационные силы пропорциональны массе. В очень высоком вакууме атомы U-235 и U-238 будут падать с одинаковым ускорением, но так же, как перо и камень падают с разными скоростями в воздухе, где имеются силы трения, препятствующие движению, возможны условия, при которых сочетание гравитационных и противодействующих им внутримолекулярных сил заставит тяжелые атомы двигаться отлично от легких. Электрическими и магнитными полями легче управлять, чем гравитационными или «псевдогравитационными» (т. е. полями центробежных сил) и они весьма эффективны в разделении ионов различной массы.

9.5. Кроме гравитационных или электромагнитных сил, существуют внутриатомные и внутримолекулярные силы. Это силы взаимодействия между молекулами, и ими определяются скорости химических реакций, процессов испарения и т. д. Вообще говоря, такие силы зависят от внешних электронов молекул, а не от массы ядра. Однако, там, где силы взаимодействия между отдельными атомами или молекулами приводят к образованию новых молекул, влияние массы (обычно очень малое) сказывается.

В соответствии с законами квантовой механики, уровни энергии молекул несколько меняются, причем для разных изотопов поразному. Это, как мы увидим, вызывает некоторые изменения в поведении двух изотопов в определенных химических реакциях, хотя

различие в поведении значительно меньше обычного различия в химическом поведении разных элементов.

9.6. Таким образом, главными факторами, которые следует иметь в виду при выборе процесса разделения, являются: равенство средней тепловой кинетической энергии молекул при данной температуре; гравитационные или центробежные эффекты, пропорциональные массе молекул; электрические или магнитные силы, влияющие на ионизованные молекулы, и внутриатомные или внутримолекулярные силы. В некоторых процессах разделения изотопов используется только один какой-нибудь из этих факторов, и общая степень разделения может быть предсказана. В других процессах разделения несколько этих факторов встречаются одновременно, так что такое предсказание становится затруднительным.

КРИТЕРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ

9.7. Раньше, чем приступить к детальному рассмотрению отдельных процессов разделения изотопов, мы выясним, какие общие требования предъявляются к этому процессу. Главные критерии для суждения о процессе разделения изотопов описываются нами ниже.

КОЭФФИЦИЕНТ РАЗДЕЛЕНИЯ

9.8. Коэффициент разделения, или как его иногда называют, коэффициент обогащения какого-либо разделительного процесса, это — отношение относительной концентрации выделяемого изотопа после обогащения к его относительной концентрации в исходном продукте. Точнее, если до разделения числа атомов изотопов с массами m_1 и m_2 равны, соответственно, n_1 и n_2 (на 1 *г* смеси изотопов), а после разделения соответствующие числа равны n'_1 и n'_2, то коэффициент разделения равен

$$r = \frac{n_1'/n_2'}{n_1/n_2}.$$

Это определение применимо как к одной ступени разделительной установки, так и ко всей установке, состоящей из многих ступеней. Обычно нас интересует либо коэффициент разделения одной ступени, либо общий коэффициент разделения всего процесса. Если

r мало отличается от единицы, как это часто бывает для одной ступени, то иногда удобнее пользоваться величиной $r-1$ вместо r. Величину $r-1$ называют коэффициентом обогащения. В природном уране $m_1=235$, $m_2=238$ и $n_1/n_2 = \sim{}^1/_{140}$, в 90%-ном U-235, $n'_1/n'_2={}^9/_1$. Таким образом, при получении 90%-ного U-235 из природного урана общее значение величины r должно быть равно около 1260.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

9.9. Почти для всех способов разделения высокий коэффициент разделения достигается за счет низкого выхода. В дальнейшем, если не будет специальной оговорки, мы будем выражать производительность количеством чистого U-235. Таким образом если, например, разделительный аппарат обладает коэффициентом разделения 2 (т. е. $n'_1/n'_2={}^1/_{70}$) и производительностью в 1 грамм в день, то это означает, что из природного урана этот аппарат дает за один день продукт, состоящий из смеси 1 *г* U-235 и 70 *г* U-238.

ЗАГРУЗКА

9.10. Общее количество вещества, содержащееся в разделительной установке, называется «загрузкой». Загрузка может достигать весьма больших величин в установке, состоящей из большого числа ступеней.

ПУСКОВОЙ ПЕРИОД

9.11. В разделительной установке с большой загрузкой требуется довольно продолжительное время — недели или месяцы — от начала пуска до достижения стационарных условий работы. При расчете времени этот «пусковой период», или период установления равновесия, должен быть добавлен ко времени строительства завода.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ

9.12. Из общего количества сырья, поступающего в разделительную установку, часть будет обогащена легкой компонентой, часть обеднена, часть останется неизмененной. Некоторое количество каждой из этих трех фракций будет потеряно и часть регенерирована. Очевидно, что важно иметь метод высоко производительного восстановления обогащенного вещества. В некоторых

процессах количество неизмененного вещества ничтожно мало; но в некоторых, особенно в электромагнитном методе, описанном ниже, это — самая большая фракция, и, следовательно, эффективность, с которой она восстанавливается для повторного цикла, является весьма существенной. Значимость регенерации обедненного продукта существенно зависит от степени обеднения отвала. Таким образом, вообще говоря, понятие эффективности не является вполне однозначным.

СТОИМОСТЬ

9.13. Так же, как и для всех частей проекта по урану, выигрыш во времени был значительно важнее, чем материальные издержки. Поэтому целый ряд больших разделительных установок для U-235 и дейтерия обошлись дороже, чем было бы необходимо, если бы строительство было отложено на несколько месяцев или лет, до тех пор пока не были бы разработаны более совершенные процессы.

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ

ГАЗОВАЯ ДИФФУЗИЯ

9.14. Еще в 1896 г. лорд Рэлей показал, что смесь двух газов различных атомных весов может быть частично разделена, если заставить смесь диффундировать через пористую перегородку в вакуум. Молекулы легкого газа благодаря большей их средней скорости диффундируют через перегородку быстрее, вследствие чего прошедший через перегородку газ обогащен более легкой компонентой, а оставшийся газ (который не прошел через перегородку) обеднен легкой компонентой. Газ, максимально обогащенный легкой компонентой, получится в том случае, когда количество продиффундировавшего газа настолько мало, что не вызывает заметного обеднения оставшегося газа. Если процесс диффузии длится до тех пор, пока почти весь газ не прошел через перегородку, то среднее обогащение прошедшего газа естественно уменьшается. В следующей главе это явление рассмотрено более детально. Здесь мы только укажем, что принимая скорости диффузии обратно пропорциональными корням квадратным из молекулярных весов, мы получаем для коэффициента разделения

в начальной стадии процесса диффузии, называемого «идеальным коэффициентом разделения» α, следующее выражение:

$$\alpha = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}},$$

где M_1 — молекулярный вес более легкого и M_2 — молекулярный вес более тяжелого газа. Применяя эту формулу к случаю урана, можно убедиться в трудности задачи разделения его изотопов.

Так как сам уран не является газом, то для разделения нужно применить какое-нибудь его газообразное соединение. Единственно подходящим является шестифтористый уран, UF_6, давление пара которого равно одной атмосфере при температуре 56° С. Так как фтор имеет только один изотоп, то шестифтористыми соединениями являются $U^{235}F_6$ и $U^{238}F_6$ с молекулярными весами 349 и 352, соответственно.

Таким образом, если небольшому количеству шестифтористого урана дать диффундировать через пористую перегородку, то прошедший газ будет обогащен соединением $U^{235}F_6$ с коэффициентом

$$\alpha = \sqrt{\frac{352}{349}} = 1{,}0043,$$

который очень далек от требуемого 1260 (см. параграф 9.8).

9.15. Этот расчет мог бы создать впечатление о безнадежности разделения изотопов (исключая, возможно, изотопы водорода) при помощи диффузионных процессов. В действительности, однако, такие методы могут с успехом применяться — даже для урана. Метод, который был применен Ф. В. Астоном впервые при частичном разделении изотопов (неона), был как раз метод газовой диффузии. Позднее Г. Герц и другие, работая с многоступенчатыми диффузионными агрегатами с рециркуляцией, смогли добиться практически полного разделения изотопов неона. Так как многоступенная система с рециркуляцией необходима почти при всех методах разделения, она будет подробно описана сразу же после вступительных замечаний о различных методах, к которым она имеет отношение.

ФРАКЦИОННАЯ ПЕРЕГОНКА

9.16. Разделение при помощи перегонки смесей веществ с разными точками кипения, т. е. разными упругостями пара — процесс

хорошо известный в промышленности. Разделение спирта и воды (разность температур кипения около 20° С) обычно проводится в простом перегонном кубе без использования каких-либо аппаратов, кроме выпарного аппарата и конденсатора. Конденсируемое вещество (конденсат) может быть собрано и снова перегнано, если это нужно, несколько раз. Для разделения соединений с очень близкими точками кипения было бы слишком трудно проводить необходимое число последовательных выпариваний и конденсаций. Вместо этого применяют метод непрерывного разделения в разделительной колонне. Основной задачей этой колонны является создание потока пара, направленного вверх, и потока жидкости, стекающей вниз, — оба потока находятся в тесном соприкосновении и постоянно обмениваются молекулами. Молекулы фракции с более низкой точкой кипения имеют относительно бо́льшую тенденцию попасть в поток паров, и наоборот. Такой метод перегонки с противотоком можно применять для разделения легкой и тяжелой воды, точки кипения которых различаются на 1,4° С.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОТИВОТОКА

9.17. Метод противотока полезен не только в двухфазных (жидкость—газ) процессах перегонки, но и в других случаях разделения, таких как диффузия под влиянием температурного градиента внутри однофазных систем, или разделение под действием центробежных сил. Противоток может быть образован двумя газами, двумя жидкостями или газом и жидкостью.

ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ

9.18. Мы уже отмечали, что гравитационное разделение двух изотопов возможно, так как гравитационные силы, заставляющие молекулы двигаться вниз, пропорциональны молекулярным весам, а внутримолекулярные силы, препятствующие этому движению, зависят от конфигурации электронов, а не от молекулярных весов. Так как метод центрифугирования это — в сущности метод применения псевдогравитационных сил большой величины, то он всегда рассматривался, как метод, пригодный для разделения изотопов. Первые опыты с центрифугами потерпели, однако, неудачу. Дальнейшее усовершенствование быстроходных центрифуг Дж. У. Бимсом и другими привело к успешным результатам.

Г. К. Юри предложил высокие цилиндрические центрифуги с противотоком. Они нашли успешное применение.

9.19. В противоточной центрифуге во внешней части вращающегося цилиндра поток пара направлен вниз, а в центральной или аксиальной области — вверх. Через поверхность раздела между двумя потоками происходит постоянная диффузия обоих типов молекул из одного потока в другой; поле радиальных сил центрифуги действует сильнее на тяжелые молекулы, чем на более легкие, так что концентрация тяжелых молекул увеличивается на периферии и уменьшается в аксиальной области; для более легких молекул картина будет обратной.

9.20. Значительным преимуществом центрифуги при разделении тяжелых изотопов типа урана является то, что коэффициент разделения зависит от разности масс обоих изотопов, а не от квадратного корня из отношения масс, как в диффузионных методах.

МЕТОД ТЕРМОДИФФУЗИИ

9.21. Из кинетической теории газов следует, что скорости диффузии газов с разными молекулярными весами различны. Возможность практического осуществления разделения изотопов при помощи термодиффузии была впервые показана при теоретическом исследовании столкновений молекул и сил взаимодействия между ними. Исследования, проведенные Энскогом и Чэпменом до 1920 г., показали, что, если в смеси газов имеется температурный градиент, то один тип молекул будет стремиться концентрироваться в холодной области, а другой — в горячей. Это стремление зависит не только от молекулярных весов, но также от сил взаимодействия между молекулами. Если газ представляет собой смесь двух изотопов, то более тяжелый изотоп может собираться в горячей области, или в холодной, или совсем не накопляется, в зависимости от природы внутримолекулярных сил. Направление разделения может измениться на обратное при изменении температуры или относительной концентрации.

9.22. Явление термодиффузии впервые было использовано для разделения изотопов Г. Клузиусом и Г. Дикелем в Германии в 1938 г. Они построили вертикальную трубу, вдоль оси которой была натянута нагретая проволока, создававшая разность темпе-

ратур около 600° С между осью и периферией. Эффект получился двойной. Во-первых, тяжелые изотопы в тех веществах, которые изучались Клузиусом и Дикелем, концентрировались вблизи холодной внешней стенки, и, во-вторых, холодный газ на периферии имел тенденцию опускаться вниз, а горячий газ на оси — подниматься вверх. Такая тепловая конвекция установила встречный поток, и термодиффузия вызвала преимущественный поток тяжелых молекул к периферии через поверхность раздела между двумя потоками.

9.23. Теория термодиффузии в газах достаточно сложна; теории явления термодиффузии в жидкостях совсем нет. Однако, эффект разделения наблюдается и с успехом использовался для разделения легкого и тяжелого шестифтористого урана.

МЕТОД ХИМИЧЕСКОГО (ИЗОТОПНОГО) ОБМЕНА

9.24. Во вступительной части к этой главе мы отмечали, что есть основания считать, что разделение изотопов может быть достигнуто обычными химическими реакциями. Действительно, было найдено, что так называемая константа равновесия в простых обменных реакциях между соединениями двух разных изотопов для обоих изотопов не в точности одинакова, и таким образом в реакциях такого типа разделение возможно. Так, при каталитическом обмене атомами водорода между газообразным водородом и водой, вода содержит в три-четыре раза больше дейтерия, чем находящийся с ней в равновесии газообразный водород. Для водорода и паров воды наблюдается тот же эффект, но равновесие устанавливается быстрее. Этот метод можно приспособить для осуществления непрерывного процесса с противотоком, аналогичного применяемому при перегонке, и такие установки действительно используются для получения тяжелой воды. Общий метод хорошо понятен, однако известно, что эффективность разделения, вообще говоря, уменьшается с увеличением молекулярного веса, так что вероятность успешного применения его для тяжелых изотопов, подобных урану, невелика.

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД

9.25. Электролитический метод разделения изотопов основан на том открытии, что вода в электролитических ваннах, приме-

няемых в обычном промышленном производстве водорода и кислорода, имеет повышенную концентрацию молекул тяжелой воды. Полного объяснения этого явления еще нет. Всю продукцию тяжелого водорода до войны практически получали электролитическим методом. Наибольшее количество производилось в Норвегии, но в достаточных для многих экспериментальных целей количествах тяжелый водород получался и в США.

ОБЩИЙ ОБЗОР СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

9.26. Описанные выше шесть методов разделения изотопов (диффузия, перегонка, центрифугирование, термодиффузия, изотопный обмен и электролиз) были испытаны с известным успехом либо на уране, либо на водороде, либо на обоих веществах. Каждый из этих методов основан на небольших различиях *в среднем* поведении молекул различных изотопов. Так как средние величины, по определению, являются предметом статистики, то все методы, зависящие в основном от среднего поведения, называются статистическими методами.

9.27. С точки зрения критериев, установленных для суждения о процессах разделения, все шесть статистических методов довольно схожи. В каждом случае коэффициент разделения не велик, так что требуется много последовательных ступеней разделения. В большинстве случаев на установках среднего размера может быть переработано относительно большое количество вещества. Загрузка и пусковой период (время установления равновесия) значительно колеблются, но обычно высоки. Сходство шести методов исключает возможность окончательного выбора метода без предварительного подробного изучения данного изотопа, требуемой производительности и т. д. Реакция обмена и электролитические методы вероятно непригодны в случае урана; точно так же никакая схема перегонки себя не оправдала. Остальные три метода были разработаны с различным успехом для урана, но не применяются для водорода.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МЕТОД И ПРЕДЕЛЫ ЕГО ПРИМЕНИМОСТИ

9.28. Существование нерадиоактивных изотопов впервые было доказано при изучении ионизованных молекул газа, движущихся

в электрическом и магнитном полях. Это — поля, которые являются основой так называемого масс-спектрографического или электромагнитного метода разделения изотопов. Электромагнитный метод является наиболее подходящим для определения относительного содержания (распространенности) изотопов. Он обычно применяется для проверки результатов разделения изотопов ура-

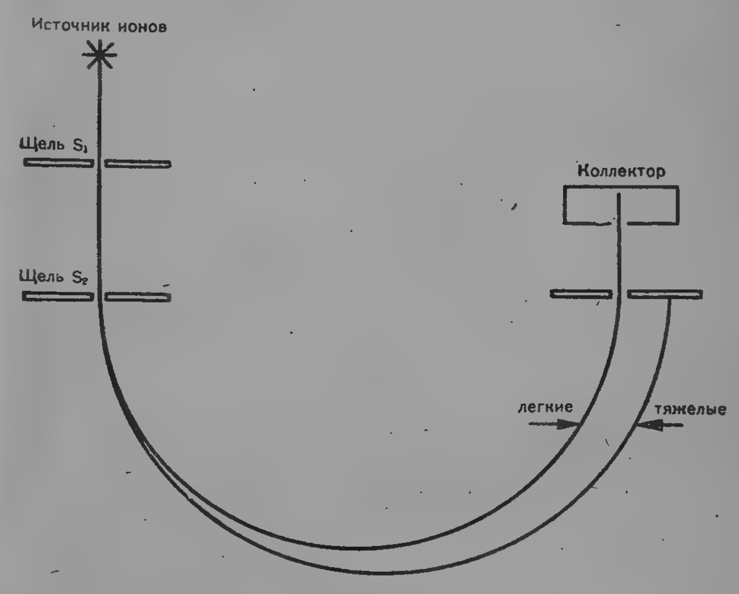


Рис. 5. Магнитное поле перпендикулярно к плоскости чертежа.

на методами, описанными выше. Ценность электромагнитного метода заключается в том, что с его помощью легко произвести почти полное разделение изотопов, очень быстро, с малой загрузкой и с коротким пусковым периодом. Чтобы ответить на вопрос, почему же тогда рассматриваются любые другие методы разделения, достаточно напомнить, что обычный масс-спектрограф может разделять лишь ничтожные количества вещества, обычно порядка долей микрограмма в час.

9.29. Чтобы понять причину такой ограниченной производительности, мы опишем в общих чертах принцип действия простого масс-спектрографа, впервые употреблявшегося А. Дж. Демпстером в 1918 г. Прибор изображен схематически на рис. 5. Раз-

деляемое газообразное соединение вводится в пространство, где часть его молекул ионизуется электрическим разрядом. Некоторые из ионов проходят через щель S_1. Между S_1 и S_2 они ускоряются электрическим полем, которое сообщает им всем практически одинаковую кинетическую энергию, в тысячи раз большую средней тепловой энергии. Так как теперь все ионы обладают практически одинаковыми кинетическими энергиями, то более легкие ионы должны иметь меньшее количество движения, чем более тяжелые. Попадая в магнитное поле через щель S_2, все ионы движутся (перпендикулярно магнитному полю) по полуокружностям с радиусами, пропорциональными их количествам движения. Поэтому легкие ионы будут двигаться по меньшей полуокружности, чем тяжелые, и, если поместить коллектор в соответствующее положение, будут собраны только легкие ионы.

9.30. Оставляя в стороне детальное рассмотрение прибора, мы отметим лишь главные причины, лимитирующие количества разделяемого вещества. Эти причины состоят в следующем: во-первых, трудно получить большие количества газообразных ионов; во-вторых, берется очень узкий пучок ионов (как показано на рисунке), так что используется только часть полученных ионов: в-третьих, слишком большие плотности ионов в пучке могут вызвать эффект объемного заряда, который мешает разделению.

Все разработанные до 1941 г. устройства, основанные на электромагнитном методе, имели большие коэффициенты разделения, но низкие производительность и эффективность. Это послужило причиной того, почему летом 1941 г. Комитет по урану отказался от применения электромагнитных методов для выделения U-235 в больших масштабах (см. параграф 4.31). Позднее, однако, было показано, что указанные ограничения не непреодолимы. Действительно, первые образцы чистого U-235 ощутимых размеров были получены посредством электромагнитного разделения, как это описано в следующей главе.

ДРУГИЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ

9.31. В дополнение к методам разделения изотопов, описанным выше, было испытано также несколько других. Метод ионной подвижности, как указывает название, основан на следующем факте.

В растворе электролита два иона, химически тождественные, но с различными массами, движутся через раствор с различными скоростями под действием электрического поля. Однако, различие в подвижности мало и легко затемняется возмущающими явлениями. А. К. Бруэр (Бюро Стандартов) сообщал, что добился разделения изотопов калия этим методом. Бруэр также получил интересные результаты с методом выпаривания. В главе XI описаны два новые электромагнитные метода — изотронный и метод ионного центрифугирования. Изотронный метод дал некоторое количество образцов порядочных размеров частично разделенного урана; на ионной центрифуге также были получены образцы, обнаруживающие разделение урана, но ее работа была неустойчива.

КАСКАДНЫЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ

9.32. Во всех статистических методах разделения изотопов для получения вещества, содержащего 90% или больше U-235 или дейтерия, необходимо много последовательных ступеней разделения. Если поток движется непрерывно от одной ступени к следующей, то ряд таких последовательных ступеней разделения называется каскадом (фракционирующая колонна из отдельных тарелок является примером простого каскада разделительной установки). Теория каскада была разработана Р. П. Фейнменом (Принстон) и другими для определенного типа электромагнитного сепаратора и К. Когеном и И. Капланом (Колумбийский университет), М. Бенедиктом и А. М. Сквайрсом (корпорация Келлекс) и др. — для диффузионных процессов. Здесь мы отметим только два момента, касающиеся многоступенчатых, или «каскадных» установок.

9.33. В каскадных установках должна быть применена рециркуляция. В установке для выделения U-235 вещество, поступающее в любую ступень, кроме первой, уже обогащено U-235. Часть этого вещества может быть еще раз обогащена при прохождении через эту ступень. Остальная часть вещества будет обеднена, но все же не полностью обесценена. Она должна быть возвращена на рециркуляцию в более низкую ступень. Даже обедненное вещество из первой (наименее обогащенной) ступени нужно направить на рециркуляцию, так как некоторое количество U-235, которое в нем содержится, может быть извлечено (регенерировано).

9.34. Рассматривая установившуюся работу ступени, мы увидим, что полезный поток урана сквозь первую ступень должен быть по крайней мере в 140 раз больше, чем сквозь последнюю ступень. Полезный поток в любой ступени пропорционален относительной концентрации U-238 и таким образом уменьшается с числом пройденных ступеней. Так как любой данный образец вещества подвергается многократной рециркуляции, то количество вещества, прошедшего через любую ступень, значительно больше, чем полезный поток сквозь эту ступень, но пропорционально ему.

9.35. Мы остановились на этих вопросах, чтобы осветить ту сторону проблемы разделения, которая не всегда очевидна, а именно, что процесс разделения, являющийся лучшим для ранних ступеней разделения, не обязательно является лучшим для последующих ступеней. Факторы, которые мы отметили, различны не только для разных ступеней, но и для разных процессов разделения. Например, рециркуляция значительно проще осуществляется на диффузионной установке, чем на электромагнитной. Установка, сочетающая два или более процесса, может оказаться наилучшей для достижения требуемого конечного разделения. На более низкой (следовательно более крупной) ступени размеры потребного оборудования и мощности могут определить выбор процесса. На более высокой (меньшей) ступени эти факторы уступают удобству в эксплоатации и времени установления равновесия, которые могут сделать более выгодным другой метод.

УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЯЖЕЛОЙ ВОДЫ; ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА ПО МЕТОДУ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ

9.36. Следующие две главы посвящены описанию трех методов, применяемых для промышленного разделения изотопов урана. Они имеют наибольшее значение для Проекта в настоящее время. В начале работы представлялось, что центрифугирование может оказаться наилучшим методом разделения изотопов урана, и что в качестве замедлителя потребуется тяжелая вода. Мы кратко опишем опытную установку по методу центрифугирования и завод для производства тяжелой воды.

ЗАВОДЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЯЖЕЛОЙ ВОДЫ

9.37. Для концентрации дейтерия использовались два метода: фракционная перегонка воды и метод изотопного обмена водород — вода.

9.38. В первом из них применяются хорошо разработанные методы фракционной перегонки, но требуемая длительность перегонки очень велика, так как разность точек кипения легкой и тяжелой воды незначительна. По той же причине количество потребного пара очень велико. Метод очень дорог, но заводы могли быть сооружены при минимуме исследовательских работ. Заводы были начаты стройкой фирмой Дюпон в январе 1943 г. и пущены в ход в январе 1944 г.

9.39. Второй метод производства тяжелой воды основан на каталитическом обмене дейтерием между газообразным водородом и водой. Когда такой обмен при помощи катализаторов устанавливается, концентрация дейтерия в воде, как указывалось, больше, чем в газе, приблизительно в три раза.

9.40. При осуществлении процесса изотопного обмена воду подают в колонну противотоком к водороду и пару довольно сложным способом. На дне колонны в электролизере вода разлагается на газообразные водород и кислород, и, затем, водород, смешанный с паром, подается обратно в нижнюю часть колонны. Смесь пара и водорода проходит через слой катализатора и барботирует через стекающую вниз воду. Сущность процесса заключается в том, что часть дейтерия, находившегося первоначально в водороде, концентрируется в паре и затем переносится в стекающую вниз воду. Завод состоит из каскада колонн с самой большой колонной на входе и самыми маленькими колоннами на выходе. Построение этого каскада основано на тех же принципах, которые мы рассмотрели выше в общем обзоре методов разделения. Осуществление процесса требует очень активных катализаторов для обменных реакций. Наиболее эффективный катализатор был найден Х. С. Тэйлором в Принстонском университете. Одновременно, менее активный катализатор был открыт А. фон-Гроссе. Для улучшения этих катализаторов Р. Г. Крист (Колумбийский университет) сделал необходимые определения физических констант, а Г. Р. Арнольд (фирма Дюпон) провел работы по усовершенствованию одного из катализаторов.

9.41. Описанный процесс был экономичен. Ввиду необходимости применения электролитического водорода установка была расположена на территории завода Consolidated Mining and Smelting Co. в Трэйле (Британская Колумбия, Канада). Строительством завода руководил Э. В. Мерфри и Ф. Т. Бар из фирмы Standard Oil Development Co.

ОПЫТНЫЙ ЗАВОД ПО МЕТОДУ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ

9.42. В первые дни существования Проекта наиболее подходящими методами разделения урана долго считали метод газовой диффузии и метод центрифугирования. Реализация обоих методов в широком масштабе представляла значительные трудности. После реорганизации, в декабре 1941 г., исследование и развитие метода центрифугирования продолжалось в Виргинском университете и в лаборатории Standard Oil Development Co. в Бэйуэй. Для достижения высоких скоростей на больших центрифугах серьезная работа была проведена фирмой Westinghouse Electric and Manufacturing Co. в Ист-Питсбурге.

9.43. Вследствие больших технических затруднений, возникших в связи с этим, вместо установки промышленного масштаба, была разрешена и построена опытная установка в Бэйуэй. Она успешно работала, и на ней было достигнуто разделение, приближающееся к предсказанному теорией. Позднее установка была остановлена, и работы по методу центрифугирования прекращены. Поэтому в настоящем отчете метод центрифугирования дальше не рассматривается.

РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ И ПРОИЗВОДСТВО ПЛУТОНИЯ

9.44. Наиболее важные методы разделения изотопов, которые были описаны, в принципе были известны и применялись на практике до того, как задача разделения изотопов урана приобрела первостепенное значение. Эти методы не применялись ни для урана (если не говорить о выделении нескольких микрограммов), ни для других веществ в масштабе, сколько-нибудь сравнимом с потребностями настоящего времени. Основными вопросами были стоимость, выход и время, а не принципы разделения. Другими словами, проблема была в основном техническая, а не научная.

Получение плутония достигло большого размаха только после того, как стал работать первый котел, и были получены первые микрограммы плутония. Но даже и после этого многие эксперименты, проведенные по плутонию, представляли существенный интерес с точки зрения применения для военных нужд как U-235, так и плутония, и для будущего развития вопросов атомной энергии. Вследствие этого, вопросы производства плутония продолжали представлять более общий интерес, чем вопросы разделения изотопов. Многие исключительно интересные специальные проблемы возникли при разрешении вопроса разделения и потребовали высококвалифицированных научных сил для их разрешения, но они пока еще должны сохраняться в секрете. По этим причинам настоящий не технический отчет делает основной упор на вопрос о плутонии и уделяет меньше места вопросам разделения. Этим мы не хотим сказать, что проблема разделения легче разрешима или что ее разрешение имеет меньшее значение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ

9.45. За исключением электромагнитного метода разделения, разделение изотопов основано на небольших отличиях в среднем поведении молекул. Они используются в шести «статистических» методах разделения: (1) газовая диффузия, (2) перегонка, (3) центрифугирование, (4) термодиффузия, (5) обменные реакции, (6) электролиз. Вероятно только методы (1), (3) и (4) подходят для урана, а (2), (5) и (6) более пригодны для выделения дейтерия из водорода. Во всех «статистических» методах коэффициент разделения не велик, так что они требуют многих ступеней, но каждый метод дает возможность переработать большое количество вещества. Все эти методы были успешно опробованы до 1940 г., но ни один из них не применялся в промышленном масштабе, и ни один из них не был использован для урана. Производительность электромагнитного метода еще меньше, но коэффициент разделения больше.

Для промышленного применения электромагнитного метода существовали очевидные ограничения. Благодаря различиям характеристик процесса в различных ступенях разделения, допускалась возможность преимуществ комбинирования двух или бо-

лее методов. Проблема развития одного или всех этих методов является не научной, принципиальной, а технической проблемой масштаба и стоимости. Поэтому эти вопросы могут быть освещены более кратко, чем вопросы плутония, хотя они имеют не меньшее значение. Была построена и успешно работала опытная центрифуга. Промышленная установка не была построена. Были построены также заводы для производства тяжелой воды по двум различным методам.

ГЛАВА X

РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ УРАНА ГАЗОВОЙ ДИФФУЗИЕЙ

ВВЕДЕНИЕ

10.1. В феврале 1940 г. небольшие количества концентрированных фракций трех изотопов урана с массовыми числами 234, 235 и 238 были получены А. О. Ниром при помощи масс-спектрометра и переданы Э. Т. Буту, А. фон-Гроссе и Дж. Р. Данингу для исследования при помощи циклотрона Колумбийского университета. Эти ученые вскоре показали, что именно изотоп U-235 способен делиться под действием тепловых нейтронов. Естественно, поэтому, что эта руководимая Данингом группа стала более, чем когда-либо, работать над разделением изотопов урана в больших масштабах.

10.2. Метод диффузии, повидимому, впервые был серьезно рассмотрен Данингом в записке к Дж. Б. Пеграму, которая была переслана Л. Дж. Бригсу осенью 1940 г. Эта записка подводила итоги предварительным исследованиям, которые были проведены Э. Т. Бутом, А. фон-Гроссе и Дж. Р. Данингом. Работа была ускорена в 1941 г. финансовой помощью, обусловленной контрактом, которую Г. К. Юри получил от Военно-морского флота для изучения разделения изотопов, главным образом методом центрифугирования. В течение этого периода Ф. Дж. Слэк (Университет Вандербильта) и В. Ф. Либи (Калифорнийский университет) присоединились к группе.

Контракт ОСРД (OEMsr-106), который был заключен ранее специально для изучения диффузии, вошел в силу 1 июля 1941 г. сроком на 1 год. Работа во все увеличивающихся масштабах продолжалась по ряду контрактов с ОСРД и с Армией до

конца весны 1945 г. До мая 1943 г. Данинг непосредственно отвечал за эту работу. Юри был ответственным за статистические методы разделения изотопов вообще. С этого времени до февраля 1945 г. Юри был прямым руководителем той части работ по диффузии, которая проводилась в Колумбийском университете; Данинг оставался руководителем одного из основных разделов этой работы.

1 марта 1945 г. лаборатория была принята от Колумбийского университета фирмой Carbide and Carbon Chemicals Corporation. В начале 1942 г. по предложению Э. В. Мерфри для разработки проектов установки производственного масштаба, оборудования для диффузионных заводов и, возможно, постройки завода была привлечена фирма M. W. Kellog Co. Чтобы довести до конца все предприятие, была образована новая, дочерняя компания, названная Kellex Corporation. В январе 1943 г. ответственность за работу завода была передана фирме Carbide and Carbon Chemicals Corporation.

10.3. Как отмечалось в главе IV, в конце 1941 г. была доказана, в принципе, возможность разделения шестифтористого урана посредством одноступенчатой диффузионной установки с пористой перегородкой (например фильтром, изготовленным травлением тонкой фольги сплава цинк-серебро соляной кислотой). Большая работа была проведена по перегородкам и насосам, но ответ, вполне удовлетворительный для работы в производственном масштабе, найден не был. Наряду с этим, К. Когеном был начат ряд теоретических исследований, на которые мы уже ссылались, — относительно того, какой путь использования процесса диффузии является наилучшим, т. е. сколько ступеней может потребоваться, какова общая потребная площадь перегородок, какой объем газа должен циркулировать и т. д. Теоретические исследования и разработка схемы процесса М. Бенедиктом намного увеличили наши сведения в этой области и послужили основой для проектирования большого завода.

10.4. Информация, полученная из Англии, и визит английской группы зимой 1941—1942 г. осветили ряд пунктов. В это время англичане сами проектировали диффузионную разделительную установку, так что дискуссия с Ф. Симоном, Р. Пайерлсом и другими была особенно ценной.

ПРИНЦИПЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ДИФФУЗИИ

ОДНОСТУПЕНЧАТАЯ ДИФФУЗИЯ

10.5. Как было указано в прошлой главе, скорость диффузии газа через идеальную пористую перегородку обратно пропорциональна квадратному корню из его молекулярного веса. Так, если газ, состоящий из двух изотопов, начинает диффундировать через перегородку в эвакуированный сосуд, то более легкий изотоп (с молекулярным весом M_1) диффундирует быстрее, чем более тяжелый (с молекулярным весом M_2). В результате (в течение, по крайней мере, короткого промежутка времени) относительная концентрация более легкого изотопа за перегородкой становится выше, чем до перегородки. Но, если позволить процессу неограниченно продолжаться, устанавливается равновесие, и концентрации по обеим сторонам перегородки выравниваются. Даже в случае, если газ, который прошел через перегородку, откачивается насосом, относительное количество тяжелого изотопа, проходящего через перегородку, будет возрастать, так как более легкий изотоп в исходном газе (до перегородки) израсходован в начале процесса диффузии.

10.6. Для отдельного цикла диффузии увеличение относительной концентрации легкого изотопа в диффундирующем газе, по сравнению с подводимым газом, может быть выражено через коэффициент разделения r, или через коэффициент обогащения $r—1$, которые были определены в параграфе 9.8 предыдущей главы. Можно вывести довольно простое уравнение для зависимости $r—1$ от молекулярного веса и продиффундировавшей доли исходного газа. Если эта доля очень мала, уравнение превращается в $r=\alpha$ («идеальный коэффициент разделения» параграфа 9.14). Если эта продиффундировавшая доля имеет заметную величину, уравнение дает ожидаемое уменьшение разделения. Например, если количество продиффундировавшего газа равно половине подаваемого, то $r-1=0{,}69(\alpha-1)$ или, для шестифтористого урана, $r=1{,}003$, вместо $r=1{,}0043$ для случая, когда продиффундировала очень небольшая часть исходного газа.

КАСКАД

10.7. Для того, чтобы разделить изотопы урана, необходимо применять много последовательных ступеней диффузии (каскад),

так как $\alpha = 1{,}0043$ для $U^{235}F_6$ и $U^{238}F_6$ (возможный газ для разделения урана). Исследования Когена и др. показали, что наилучшей гидравлической схемой для последовательных ступеней является такая, при которой половина газа, нагнетаемого в каждую ступень, диффундирует через перегородку, а другая (обедненная) половина направляется на вход предыдущей ступени. Для такого устройства, как мы видели, идеальный коэффициент разделения между входом и выходом одной ступени равен $0{,}69(\alpha - 1)$. Это число часто называют ε — «полным обогащением на ступень». Для шестифтористого урана теоретическое значение $\varepsilon = 0{,}003$, но на практике оно несколько меньше в результате «обратной диффузии», неполного смешения на стороне высокого давления и несовершенства перегородки. Первые опыты по разделению шестифтористого урана (произведенные Е. Т. Бутом, Г. К. Пэкстоном и К. Б. Слэйдом) дали в результате значение $\varepsilon = 0{,}0014$. Если желательно получить $U^{235}F_6$ 99%-ной чистоты и если используется каскад, в котором каждая ступень имеет нормальный коэффициент обогащения, то потребуется приблизительно 4000 ступеней.

ЦИРКУЛЯЦИЯ ГАЗА В КАСКАДЕ

10.8. Из газа, который прошел через перегородку любой данной ступени, только половина проходит через перегородку следующей, высшей ступени. Другая половина возвращается на предыдущую ступень. Таким образом, большая часть вещества циркулирует много раз, прежде чем, в конечном итоге, выйдет из каскада. Подсчет показывает, что для промышленной установки по разделению урана может оказаться необходимым пропустить через перегородки первой ступени объем газа в 10 000 раз больший объема газа, выходящего из последней ступени каскада (т. е. в виде окончательного продукта $U^{235}F_6$). Соответствующие значения для высших ступеней быстро падают вследствие уменьшения количества $U^{238}F_6$, который уносится в отвал.

ПРОБЛЕМА РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В ПРОМЫШЛЕННОМ МАСШТАБЕ

ВВЕДЕНИЕ

10.9. Ко времени реорганизации Проекта атомной бомбы в декабре 1941 г. теория разделения изотопов посредством газовой

диффузии была хорошо разработана. Поэтому можно было сформулировать технические проблемы, с которыми придется встретиться при постройке разделительной установки большого масштаба. Решение о размерах такой установки и о том, где ее строить, было вынесено только зимой 1942-43 г.г., т. е. примерно в то же самое время, когда были приняты решения о заводах для производства плутония.

ЦЕЛЬ

10.10. Основной целью промышленной газовой диффузионной установки являлось производство урана, содержащего примерно в 10 раз больше U^{235}, чем в естественном уране, в количестве порядка нескольких граммов в сутки. Однако, было несомненно, что установка должна была быть достаточно гибкой и позволять производить, если потребуется, значительные изменения как в степени обогащения, так и в выходе конечного продукта.

РАБОЧИЙ ГАЗ

10.11. В качестве «рабочего газа», который может быть пригоден для использования в разделительной установке, был упомянут шестифтористый уран. Немаловажным его преимуществом является то, что фтор имеет только один изотоп; вследствие чего все молекулы UF_6 данного изотопа урана имеют одинаковую массу. Это вещество высоко реактивно и при комнатной температуре и атмосферном давлении является твердым телом. Поэтому было срочно предпринято изучение других газообразных соединений урана. Для того, чтобы застраховать себя от неудач при этих поисках различных других, заменяющих UF_6 газов, необходимо было продолжать работу по шестифтористому урану — разрабатывать методы производства и схемы циркуляции этого газа.

ЧИСЛО СТУПЕНЕЙ

10.12. Число ступеней в главном каскаде установки зависит только от желаемой степени обогащения и величины полного обогащения на ступень, достижимого с реально осуществимыми перегородками. По некоторым оценкам, требовалось несколько тысяч ступеней. Предполагалась также постройка специального регенеративного каскада на несколько сот ступеней; количество сту-

пеней в нем зависит от того, сколько неотделенного U^{235} может быть допущено из экономических соображений в отвал.

ПЛОЩАДЬ ПЕРЕГОРОДОК

10.13. Мы видели, что полное количество газа, которое должно диффундировать через перегородку, очень велико по сравнению с количеством отбираемого конечного продукта. Скорость, с которой газ диффундирует через единицу площади перегородки, зависит от разности давлений по обе стороны перегородки и от ее пористости. Даже при допущении атмосферного давления по одну сторону и полного вакуума по другую и при наилучших достижимых значениях пористости, установка большого масштаба, как показывают расчеты, требует перегородок общей площадью во много акров.

КОНСТРУКЦИЯ ПЕРЕГОРОДКИ

10.14. При атмосферном давлении средний свободный пробег молекул имеет порядок десятитысячной доли миллиметра или десятой доли микрона. Чтобы обеспечить истинный «диффузионный» поток газа, диаметр бесчисленного множества отверстий в перегородке должен быть меньше одной десятой среднего свободного пробега. Следовательно, материал перегородки должен иметь миллионы отверстий диаметра меньшего или равного 0,01 микрона ($4 \cdot 10^{-7}$ дюйма) и почти не содержать отверстий с диаметром, превышающим эту величину. Отверстия не должны увеличиваться или закупориваться в результате прямой коррозии или пыли, возникающей при коррозии где-нибудь в системе. Перегородка должна быть способна противостоять «напору» в одну атмосферу. Перегородка должна легко изготовляться для того, чтобы можно было производить ее в больших количествах и однородной по качеству. К январю 1942 г. был сделан в небольших количествах и испытан на коэффициент разделения и пористость ряд различных типов перегородок. Некоторые казались очень обещающими, но ни одна перегородка не подвергалась таким испытаниям, которые могли бы установить ее пригодность для производства в больших масштабах и для промышленного использования.

НАСОСЫ И ПОТРЕБНАЯ МОЩНОСТЬ

10.15. Схема разделительной установки такова, что в любой ступени приблизительно половина поступающего вещества проходит через перегородку к следующей высшей ступени, в то время как другая половина возвращается обратно в предыдущую ступень. Продиффундировавшая половина имеет низкое давление и должна быть доведена до высокого давления перед подачей в следующую ступень. Даже непродиффундировавшая часть выходит при несколько более низком давлении, чем при входе, и не может быть подана обратно на низшую ступень без подкачивания. Таким образом, циркуляция всего количества газа в ступени (включая дважды количество, которое проходит через перегородку) должна быть осуществлена при помощи насосов.

10.16. Так как поток газа сквозь ступень значительно меняется с номером ступени в каскаде, количество и размеры насосов также сильно изменяются от ступени к ступени. Тип и производительность насоса, требуемого для данной ступени, зависит не только от веса подаваемого газа, но и от требуемого напора. Сделанные к этому времени расчеты принимали давление на входе в одну атмосферу и на выходе (т. е. со стороны низкого давления перегородки) в 0,1 атмосферы. Было подсчитано, что для установки требуются тысячи насосов мощностью в тысячи киловатт. Так как газ неизбежно нагревается при сжатии, то очевидно необходимо предусмотреть систему охлаждения. К началу 1942 г. было проведено значительное количество предварительной работы по насосам. Несмотря на сложность уплотнения валов, представлялось приемлемым применение центробежных насосов, но в дальнейших экспериментальных работах проектировалось применение совершенно герметичных насосов различных типов.

УТЕЧКА И КОРРОЗИЯ

10.17. Было ясно, что система циркуляции в целом, заключающая в себе насосы, перегородки, трубопроводы и клапаны, должна быть уплотнена на вакуум. Смазочные вещества или уплотняющие среды, необходимые для насосов, не должны реагировать с рабочим газом, не должен реагировать с рабочим газом также ни один из применяемых в системе материалов. Взаимодействие с рабочим газом (коррозия) будет приводить не только к засоре-

нию перегородок и к различным механическим дефектам, но и к поглощению (т. е. фактической потере) частично обогащенного урана.

РЕАЛЬНЫЙ И ИДЕАЛЬНЫЙ КАСКАДЫ

10.18. В идеальном каскаде производительность насосов должна меняться от ступени к ступени. Практически неэкономично предусматривать различный тип насосов для каждой ступени. Необходимо определить, какие отступления от идеального каскада можно допустить в интересах экономичности конструкции, удобства ремонта и т. д. (т. е. определить минимальное количество типов насосов); к подобным же компромиссам приходится прибегать и для других частей каскада.

ЗАГРУЗКА И ПУСКОВОЙ ПЕРИОД

10.19. При первом пуске установка должна проработать непрерывно некоторое время, пока не будет разделено достаточное количество вещества для того, чтобы установилось соответствующее распределение концентрации по ступеням. Только после того, как такая стабилизация достигнута, можно начать отбор необходимого продукта с последней (верхней) ступени. Как загрузка, так и требуемый пусковой период достаточно велики и являются, поэтому, важными проблемами.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ

10.20. Повидимому, можно предположить только три типа потерь на установке, именно: потери вследствие утечки, потери от коррозии (т. е. химического соединения и разложения) и потери в отвал. Предполагалось, что утечка может быть сделана очень малой и что после начального периода работы потери от коррозии будут малы. Процент материала, теряемого в отвале, будет зависеть от числа регенерационных ступеней.

ДЕТАЛИ УСТАНОВКИ

10.21. Вопросы о том, в какой форме следует применять материал перегородки (в трубках или в листах, больших размеров или малых), как должно производиться смешивание, каким путем регулировать процесс и какие приборы для этого потребуются, еще требовали разрешения. Не было оснований считать их не

разрешимыми, но несомненно было, что они потребуют как теоретического, так и экспериментального изучения.

10.22. К 1942 г. теория разделения изотопов посредством газовой диффузии была хорошо разработана, и стало ясным, что потребуется очень большая установка. Основными элементами оборудования этой установки являлись диффузионные перегородки и насосы. Перегородки и насосы, которые имелись в распоряжении в то время, по испытании оказались в общем не соответствующими требованиям; поэтому дальнейшая разработка насосов и перегородок была особенно необходима. Были и другие технические вопросы, требовавшие разрешения, а именно, коррозия, вакуумные уплотнения, приборы.

ОРГАНИЗАЦИЯ

10.23. Как мы упоминали в начале этой главы, работа по диффузии была начата Дж. Р. Данингом и проводилась под наблюдением ОСРД в Колумбийском университете до 1 мая 1943 г., когда она была передана Манхэттенскому Округу. Летом 1943 г. трудности, встретившиеся в разрешении некоторых сторон Проекта, привели к значительному расширению, особенно химической группы. Г. К. Юри, в то время руководитель работы, назначил Х. С. Тэйлора (Принстон) своим заместителем и включил Э. Мака-мл. (штат Огайо), Дж. М. Мерфи (Йейл) и П. Г. Эмета (Университет Дж. Гопкинса) в руководящую группу. Большая часть работы была перенесена из лабораторий Колумбийского университета в большое здание, расположенное поблизости. Принстонские химики, занятые изучением тяжелой воды, оказали некоторую помощь в разрешении вопросов, связанных с перегородками. В начале 1944 г. Л. М. Кэри (National Carbon Co.) стал вторым заместителем руководителя, чтобы помогать Юри по связи и административной работе.

10.24. Как было упомянуто, фирме M. W. Kellog Co. в начале 1942 г. было поручено проектировать промышленную установку. С этой целью фирма Келлог создала специальную дочернюю организацию, названную Kellex Corporation, с П. К. Лейтом в качестве исполняющего обязанности директора и технического руководителя, А. Л. Бекером в качестве руководителя проекта и Дж.

Г. Арнольдом в качестве начальника исследовательского отделения. Новая вспомогательная организация проводила исследования и разработки в своих лабораториях в Джерси Сити, и в большом здании лаборатории, упомянутом в предыдущем параграфе; она разрабатывала технические схемы и схемы процесса, снабжала материалами производственную установку и наблюдала за ее постройкой. Установка была построена фирмой J. A. Jones Construction Co. в Северной Каролине.

10.24-а. Kellex Corporation, в отличие от обычных промышленных фирм, представляла собой коллектив ученых, инженеров и администраторов, собранных из всех отраслей промышленности вместе для специальной цели — продвижения только этого дела. Работа в этой организации проводилась на добровольных началах: выдающиеся лица из промышленности добровольно отказывались от выполнения своих обычных обязанностей для того, чтобы полностью посвятить все свое время работе в корпорации Келлекс. После выполнения возложенного на них дела эти люди возвращались на прежние посты в промышленности.

10.25. В январе 1943 г. фирме Carbide and Carbon Chemicals Corporation была поручена эксплоатация законченной установки. Инженеры фирмы вскоре начали играть большую роль не только в планировании и постройке, но и в исследовательской работе.

ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ, ПОСТРОЙКА И ПРОИЗВОДСТВО С 1942 ПО 1945 г.

ПРОИЗВОДСТВО ПЕРЕГОРОДОК

10.26. Еще до 1942 г. были разработаны перегородки, которые казались удовлетворительными. Однако эти перегородки, предложенные Э. Т. Бутом, Г. К. Пэкстоном и К. Б. Слэйдом, никогда не применялись в производственных масштабах вследствие малой механической прочности и слабой устойчивости к коррозии. В 1942 г. под общим руководством Бута и Ф. Дж. Слэка совместно с различными учеными, в том числе Ф. К. Никсом (телефонные лаборатории Бэлла) были изготовлены перегородки различных типов. Одно время считались достаточно удовлетворительными для применения на производстве перегородки, построенные Э. О. Норрисом и Э. Адлером. Перегородки другого типа были разработа-

ны на основе предложений нескольких работников Колумбийских лабораторий (ныне называемых лабораториями SAM), организации Келлекс, телефонных лабораторий Бэлла, фирм Bakelite Corporation, Houdaille-Hershey Corporation и др. Первые образцы перегородки типа, выбранного для общего применения на установке, были изготовлены К. А. Джонсоном (Келлекс), затем они были усовершенствованы под общим наблюдением X. С. Тэйлора. Вариант этой перегородки, предложенный лабораториями SAM, был заметно лучше других; теперь он применяется в большом количестве ступеней установки. В 1945 г. необходимо было уже не только удовлетворять минимальным требованиям, но добиваться улучшений, приводящих к большей производительности или большей экономичности эксплоатации.

10.27. В общем, история разработки перегородки напоминает автору историю проблемы защиты урановых блоков в проекте по плутонию. В обоих случаях методы широко испытывались, казалось бы, с удовлетворительными или почти удовлетворительными результатами; однако, и в том и в другом случае окончательное решение не было найдено до последней минуты, а затем принятый метод оказывался гораздо лучшим, чем предполагалось ранее.

НАСОСЫ И УПЛОТНЕНИЯ

10.28. Первые работы по насосам проводились, главным образом, под руководством Г. А. Бурса (Колумбийский университет). Когда на сцене появилась Келлекс, в 1942 г., ее инженеры, особенно Дж. В. Ватс, Дж. С. Свиринген и О. К. Брюстер, заняли руководящее положение в разработке насосов и уплотнений. Необходимо помнить, что эти насосы должны работать при пониженном давлении, не должны допускать утечки, не корродировать и иметь насколько возможно малый объем. Было испытано много различных типов центробежных (газодувных) и поршневых насосов. В одном из разработанных типов насосов (для начальных ступеней) рабочее колесо приводится во вращение через муфту, содержащую уплотняющее приспособление совершенно нового, весьма остроумного типа. Другой тип центробежного насоса совершенно герметичен, его диск и ротор приводятся во вращение извне индукционным способом.

РАЗРАБОТКА РАЗЛИЧНЫХ ВОПРОСОВ

10.29. Как и в случае проблемы плутония, так и здесь, было много вопросов относительно коррозии и т. п., подлежащих исследованию. Новые охлаждающие и смазочные вещества были разработаны А. Л. Хеном и его помощником Дж. Г. Кэйди, В. Т. Миллером с сотрудниками, Э. Т. Макби с помощниками и учеными различных фирм, в том числе Дюпон, Hooker Electrochemical Co. и Harshaw Chemical Co. Исследование и разработка этих веществ, а также определение потребности производства в этих и других химикатах, согласовывались Р. Розеном, сначала работавшим в ОСРД, затем перешедшим к Келлекс. Были разработаны методы предварительной обработки поверхностей для защиты против коррозии. Среди различных приборов, сконструированных или приспособленных для использования в Проекте, особого упоминания заслуживает масс-спектрограф. Проект много обязан помощи А. О. Нира (Миннезотский университет), который настолько усовершенствовал методы анализа изотопов с помощью масс-спектрографа, что они оказались чрезвычайно ценными для Проекта при анализах проб обогащенного урана. Масс-спектрографы также применялись для предварительного испытания вакуумных деталей на натекание и для определения загрязнений в рабочем газе.

ОПЫТНЫЕ УСТАНОВКИ

10.30. Строго говоря, опытной установки не было, т. е. не была пущена в ход разделительная установка небольшого масштаба с такими же нагнетателями, перегородками, креплениями перегородок, охлаждением и т. п., какие должны были быть применены на основной установке. Такая установка не могла быть осуществлена потому, что до начала постройки самой промышленной установки нельзя было получить ряда необходимых деталей. Строительство промышленной установки при таких условиях требовало предусмотрительности и смелости.

10.31. Однако, был осуществлен целый ряд так называемых вспомогательных установок, предназначенных для испытания различных частей или групп частей конечной установки. Вспомогательная установка № 1 представляла собою 12-ступенчатую модель с перегородками, несколько похожими на перегородки, применяемые на заводе большого масштаба, но материал перегород-

ки не был изготовлен в форме, принятой для промышленной установки, и насосы были использованы поршневые с сильфонным уплотнением, а не центробежные. Работа на этой установке в 1943 г. позволила испытать не только перегородки и общие системы разделения, но и дала сведения, касающиеся регулирующих клапанов, измерения давления, трубопровода и т. д. Установка № 2 — расширенное издание установки № 1, но только с 6 ступенями — была использована в конце 1943 и начале 1944 г., особенно для испытания приборов. Вспомогательная установка № 3-а с центробежными насосами и глухими диффузорами была также предназначена главным образом для испытания приборов. Установка № 3-b послужила опытной установкой для одной из секций промышленной установки.

УТВЕРЖДЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ УСТАНОВКИ

10.32. В декабре 1942 г. фирма Келлог была уполномочена продолжать предварительное проектирование установки, а в январе 1943 г. была разрешена постройка завода.

МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ УСТАНОВКИ

10.33. Как указывалось выше, первоначально для всех заводов Манхэттенского Округа был выбран участок в долине Тенесси, но завод плутония был в действительности построен в другом месте. Здесь же остались: уже описанная опытная установка по электромагнитному разделению (см. главу XI) и позднее термодиффузионная установка, которые были все построены в долине Тенесси в Клинтоне и известны официально под названием «Клинтонский механический завод».

10.34. Эта местность была изучена полковником Маршаллом, полковником Никольсом и представителем Stone and Webster Engineering Corporation в июле 1942 г., и приобретение участка было рекомендовано. Исполнительный комитет S-1 ОСРД на заседании в июле 1942 г. поддержал эту рекомендацию. Окончательное одобрение было дано генерал-майором Гроувзом после личного осмотра территории в 70 кв. миль. В сентябре 1942 г. были предприняты первые шаги по приобретению участка у реки Клинч, приблизительно в 30 милях от Ноксвилля (Тенесси), по площади значительно превосходящего 70 кв. миль. Опытная установка по

плутонию расположена в одной долине, установка по электромагнитному разделению — в соседней и установка по диффузионному разделению — в третьей.

10.35. Хотя развертывание завода и освоение участка в Хэнфорде производят внушительное впечатление, но они производятся одной фирмой, имеющей дело только с одной главной операцией, так что это, в некоторых отношениях, менее интересно, чем Клинтон, который сочетает в себе весьма разнообразные виды деятельности. Описание района Клинтона с множеством новых заводов, жилых районов, театров, школ, морями грязи, облаками пыли и всеобщей суматохой выходит за рамки настоящего отчета.

ДАТА НАЧАЛА ПОСТРОЙКИ

10.36. Постройка паросиловой станции для диффузионной установки началась 1 июня 1943 г. Она представляет собой одну из самых больших силовых станций подобного рода, когда-либо построенных. Постройка других главных зданий и установок начата между 29 августа и 10 сентября 1943 г.

ЭКСПЛОАТАЦИЯ

10.37. В отличие от Хэнфорда, диффузионная установка состоит из многих, более или менее независимых единиц, так что она вводилась в эксплоатацию секция за секцией, по мере того, как это позволяло продвижение строительства и испытания. Таким образом не было ни знаменательной даты начала, ни какого-либо неожиданного события, чтобы отметить это. Установка успешно заработала весной 1945 г.

10.38. Для людей, работающих по газовой диффузии, период от 1940 до 1945 г. был наполнен упорным трудом, не озаряемым такими яркими вехами, как первый котел в Чикаго. Вероятно больше, чем какая-либо другая группа в Проекте, группа, работавшая над газовой диффузией, заслуживает награды за храбрость и настойчивость, так же как и за научные и технические дарования. Из соображений секретности мы не можем рассказать, как они решали поставленные перед ними задачи, как во многих случаях они находили даже несколько решений в качестве гарантии против неудач в производстве. Это было замечательным достижением. В течение пяти лет были периоды малодушия и пес-

симизма. В настоящее время, когда завод не только работает, но работает бесперебойно, надежно и с производительностью, большей, чем ожидалось, они в значительной мере забыты.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ

10.39. Работа в Колумбийском университете по разделению изотопов по методу газовой диффузии началась в 1940 г., к концу 1942 г. проблемы разделения урана этим методом в заводском масштабе были точно сформулированы. Так как разделение одной ступенью слишком незначительно, то потребовалось несколько тысяч ступеней. Было найдено, что наилучший метод соединения многих ступеней требует многократного повторения цикла, так что количество вещества, проходящего через перегородки нижних ступеней, во много тысяч раз превышает количество обогащенного продукта, извлекаемого из последней ступени.

10.40. Основными трудностями явились разработка удовлетворительных перегородок и насосов. Требовались акры перегородок и тысячи насосов. В качестве рабочего газа, естественно, был выбран шестифтористый уран, но трудности производства и обращения с ним были столь велики, что пришлось предпринять дополнительные поиски заменителя. Так как в основном разделение должно проводиться при низком давлении, возникла проблема техники вакуума в ранее неслыханных масштабах. Было разрешено много проблем по вопросам регулирования и по приборам; широко применялись масс-спектрографы различных видов.

10.41. Исследования были произведены в основном в Колумбийском университете под руководством Данинга и Юри. В 1942 г. для постройки установки была выбрана фирма Келлог и специально создана дочерняя организация Kellex Corporation для разработки процесса и проектирования завода. Завод был построен строительной фирмой T. A. Jones Construction Co. Эксплоатация была поручена Carbide and Carbon Chemicals Corporation.

10.42. Был разработан вполне удовлетворительный тип перегородки, хотя окончательный выбор был сделан только тогда, когда постройка клинтонской установки шла полным ходом. Были разработаны два типа центробежных нагнетателей, удовлетворяющих предъявленным к ним требованиям. Установка была пущена в успешную эксплоатацию к лету 1945 года.

ГЛАВА XI

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ УРАНА

ВВЕДЕНИЕ

11.1. В главе IV мы говорили, что возможность разделения изотопов урана в больших масштабах электромагнитным методом была предсказана в конце 1941 г. Э. А. Лоуренсом (Калифорнийский университет) и Г. Д. Смитом (Принстонский университет). В главе IX мы описали основы одного из вариантов электромагнитного метода разделения и указали на три его недостатка: трудность получения ионов, ограниченное относительное количество действительно используемых ионов и влияние объемного заряда.

11.2. К концу декабря 1941 г., когда была осуществлена реорганизация всего проекта по урану, Лоуренс уже получил некоторые количества разделенных изотопов урана и при реорганизации ему было официально поручено руководить приготовлением дальнейших образцов и проведением различных вспомогательных физических измерений. Однако, как только Металлургическая лаборатория в своей работе перешла от физики цепных реакций к производству плутония в большом масштабе, отдел Лоуренса сразу приступил к разработке промышленного разделения изотопов урана электромагнитным методом. Это изменение тематики было обусловлено успехом первоначальных экспериментов в Калифорнии и развитием идей о других возможных методах в Калифорнии и Принстоне. Из многих предложенных электромагнитных схем три вскоре были признаны наиболее обещающими: «калютронная» разделительная установка, установка магнетронного типа, в дальнейшем развитая в «ионную центрифугу», и «изотронный» метод собирания ионов в группы. Первые две схемы были исследованы

в Калифорнийском университете, третья — в Принстонском. В течение первых нескольких месяцев наибольшие усилия были направлены на разработку калютрона; однако, некоторая работа по ионной центрифуге продолжалась еще в Калифорнии в течение лета 1942 г. и в малых масштабах Дж. Слепяном — в лаборатории Вестингауза в Питтсбурге в течение зимы 1944—1945 г. Работа с изотроном велась в Принстоне до февраля 1943 г., когда бо́льшая часть группы была переброшена на другую работу. Основная часть этой главы посвящена калютрону, так как именно эта установка позволила осуществить промышленное производство U-235. Кроме того, дано краткое описание термодиффузионного завода, предназначенного для обеспечения обогащенным сырьем электромагнитных разделительных установок.

11.3. Требования секретности делают невозможным здесь, как и в других частях книги, рассмотреть многие из наиболее интересных технических подробностей. Важность проблемы, однако, значительно больше, чем она представляется по отведенному ей здесь месту.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МАСС-СЕПАРАТОРЫ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РАБОТА

11.4. Масс-спектрограф А. О. Нира был первоначально предназначен для измерения относительных количеств изотопов, а не для разделения больших количеств. Используя пары бромистого урана, Нир приготовил несколько образцов с небольшими количествами разделенных изотопов урана. Однако, производительность его установки была очень низка, так как ионный ток был меньше одного микроампера. (Масс-спектрограф, в котором от источника к приемникам проходит 1 микроампер ионов урана *), будет собирать около 1 микрограмма U-235 за 16 часов). Большая необходимость в получении обогащенного U-235 для ядерных исследований была впервые осознана Лоуренсом, и он решил выяснить, что можно сделать для этой цели с помощью 37-дюймового циклотронного магнита в Беркли. Эта работа в своей начальной стадии субсидировалась Исследовательской корпорацией Нью-Йорка.

*) Здесь указывается полная величина ионного тока. Только 0,7% этой величины связано с ионами изотопа U-235. *(Прим. ред.)*.

Впоследствии субсидия была возмещена. Начиная с 1 января 1942 г., работа проводилась на средства ОСРД через Комитет S-1. Позднее, как и по другим частям проекта по урану, контракты были переданы «Манхэттенскому Округу».

11.5. В Беркли, после нескольких недель проектирования, 24 ноября 1941 г. 37-дюймовый циклотрон был демонтирован, а его магнит использован для создания магниткого поля в установке, названной впоследствии «калютроном»—название, представляющее сокращение от «California University cyclotron». Ионы создавались с помощью электронного пучка, проходящего в парах соли урана. Этот ионный источник был расположен так, как это показано на рис. 5 в главе IX, стр. 175. Затем ионы ускорялись к щели S_2, через которую они проходили в область разделения, где магнитное поле изгибало их траектории в полуокружности, оканчивающиеся на щели коллектора. К 1 декабря 1941 г. был получен пучок молекулярных ионов остатков газа в камере, а вскоре после этого и достаточно интенсивный пучок однократно заряженных ионов урана U^+. Было установлено, что значительная часть ионов, покидающих источник, является ионами U^+. Для проверки разделения был установлен коллектор с двумя карманами, расположенными друг от друга на расстоянии, соответствующем массовым числам 235 и 238. В декабре были проведены два цикла накопления с использованием пучка низкой интенсивности. Малый коэффициент разделения, полученный из анализа результатов этих первых экспериментов, оказался все же значительно выше, чем в методе газовой диффузии. В середине января 1942 г. был проведен цикл накопления разделенных изотопов с пучком значительной интенсивности и с переработкой заметного количества вещества, и был достигнут значительно лучший коэффициент разделения.

К началу февраля 1942 г. были получены пучки много большей интенсивности, и Лоуренс сообщил, что с этими пучками могут быть получены хорошие коэффициенты разделения. К началу марта 1942 г. ионный ток был еще увеличен. Полученные результаты подтверждали предположение Лоуренса о том, что объемный заряд можно нейтрализовать ионизацией остаточного газа в камере.

НАЧАЛО БОЛЬШОЙ ПРОГРАММЫ

11.6. К этому времени стало ясно, что с помощью калютрона можно осуществить разделение в значительно большем масштабе, чем это когда-либо было достигнуто ранее электромагнитным методом. Очевидно, было желательно исследовать всю область электромагнитного разделения. Исходя из этого, Лоуренс мобилизовал свою группу в лаборатории излучения Калифорнийского университета в Беркли и привлек ряд исследователей из других лабораторий. Среди тех, кто с самого начала принимал участие в разработках, проводившихся в Беркли, были: Д. Кукси, П. К. Эберсолд, В. М. Бробек, Ф. А. Дженкинс, К. Р. Макензи, В. Б. Рейнольдс, Д. Г. Слоун, Ф. Оппенгеймер, Дж. Дж. Бэкус, Б. Петерс, А. К. Гельмгольц, Т. Финкельштейн и В. Е. Паркинс-младший. Лоуренс пригласил также некоторых своих прежних студентов, а именно: Р. Л. Торнтона, Дж. Р. Ричардсона и др. Среди лиц, временно работавших в Беркли, были: Л. П. Смит из Корнельского университета, Э. У. Кондон и Дж. Дж. Слепян от фирмы Вестингауз и И. Лэнгмюр и К. Г. Кингдон от Дженерал Электрик. В течение этого раннего периода И. Р. Оппенгеймер также работал в Беркли и внес ряд ценных идей.В конце 1943 г. группа Лоуренса была еще более усилена прибытием английских физиков во главе с М. Л. Олифантом (Бирмингамский университет).

11.7. Вначале было рассмотрено большое количество различных методов и проведено много очень важных экспериментальных исследований. Основные усилия, однако, вскоре были направлены на улучшение калютрона для получения большого коэффициента разделения и большого тока в пучке положительных ионов.

НЕОТЛОЖНЫЕ ЗАДАЧИ

11.8. Из трех очевидных ограничений, описанных в первом параграфе,—трудности получения ионов, ограниченного относительного количества действительно используемых ионов и влияния объемного заряда — только последнее удалось устранить сразу. Оказалось, что объемный заряд в области пучка положительных ионов может быть нейтрализован в весьма значительной степени. Таким образом, неотложными задачами остались источник ионов большой производительности и более полное использование ионов.

11.9. Факторов, управляющих эффективностью источника ио-

нов, много. Сюда входят как устройство самого источника, так и способы, с помощью которых из него извлекают ионы. Проблемы, подлежащие разрешению, не могут быть формулированы просто и должны быть решены в значительной степени эмпирическими методами. Если бы даже соображения секретности и позволяли произвести описание бесчисленных форм источников ионов и ускоряющих систем, которые были испытаны, подобное описание было бы слишком узко специальным, чтобы приводить его здесь.

11.10. Обращаясь к проблеме более полного использования ионов, мы должны детально рассмотреть принципы работы калютрона. Калютрон основан на том, что однократно заряженные ионы, движущиеся в однородном магнитном поле, перпендикулярном к направлению их движения, описывают круговые траектории с радиусами, пропорциональными их количествам движения.

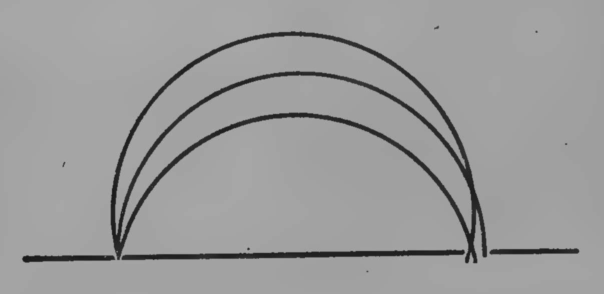


Рис. 6.

Рассмотрим теперь поведение ионов одного определенного изотопа. Ионы, которые прошли через две щели и попали в эвакуированную область, где на них действует магнитное поле, не следуют все по одному единственному направлению, но имеют различные начальные направления, лежащие внутри малого угла (рис. 6). Величина этого угла зависит от ширины щелей. Траектории всех ионов рассматриваемого изотопа представляют собою окружности одного и того же диаметра. Поэтому ионы, начавшие двигаться по слегка различным направлениям, после прохождения полуокружности почти в точности снова собираются вместе. Именно у этого положения вторичного схождения ионов расположен коллектор. Ионы другого изотопа (например, ионы с атомным

весом 238 вместо 235) ведут себя подобным же образом, за исключением того, что следуют по окружностям несколько отличного диаметра. Оба изотопа улавливаются коллекторами, находящимися в соответственных местах схождения ионов. Использование большего относительного количества ионов, образующихся в источнике, можно осуществить простым увеличением щелей. Но значительно расширять щели без потери остроты фокуса у места схождения не легко. В действительности, использование ионов может быть улучшено только применением тщательно подобранного местного изменения силы магнитного поля. К счастью, такие изменения осуществляются успешно.

11.11. Другой проблемой, не такой неотложной, но тем не менее важной для любой производственной установки, является возможно более эффективное использование магнитного поля. Так как большие электромагниты дороги как в постройке, так и в эксплоатации, было естественно рассмотреть использование одного и того же магнитного поля для нескольких пучков ионов. Практическая реализация такой экономичной схемы стала главной задачей лаборатории.

ГИГАНТСКИЙ МАГНИТ

11.12. Хотя масштаб разделения, достигнутый к марту 1942 г., во много раз превышал все, что удавалось получать раньше с помощью электромагнитных масс-сепараторов, он был еще очень далек от того, что требуется для производства вещества в количестве, имеющем военное значение. Однако, задачу нужно было решить именно в большом масштабе. С помощью 37-дюймового циклотронного магнита можно было получать полезные сведения, но, вместе с тем, было желательно использовать оборудование большего масштаба. К счастью, в Беркли изготовлялся очень большой магнит, предназначенный для гигантского циклотрона. Этот магнит с диаметром полюсов в 184 дюйма и расстоянием между полюсами в 72 дюйма был наибольшим из существующих. Работа над ним была прервана войной, но она была уже достаточно продвинута, так что могла бы быть окончена в течение немногих месяцев при наличии соответствующей субсидии. Не только сам магнит, но все вспомогательные здания, лаборатории, цехи и т. д. идеально подходили для постройки калютрона. Разумеется, рабо-

та над гигантским магнитом была продолжена, и он был готов к концу мая 1942 г. *).

ПОЛОЖЕНИЕ К СЕНТЯБРЮ 1942 г.

11.13. Первые эксперименты, в которых был использован 37-дюймовый магнит, были описаны в предыдущем параграфе. Дальнейшее развитие продолжалось в основном по двум направлениям: постройка и монтаж технической разделительной установки с 37-дюймовым магнитом и проектирование и постройка экспериментальных разделительных установок с большим магнитом.

11.14. Кроме постепенного увеличения силы ионного тока и коэффициента разделения, что являлось результатом ряда усовершенствований источника ионов и ускоряющей системы, летом 1942 г. в опытах с гигантским магнитом было достигнуто многообещающее улучшение в использовании ионов. Оказалось возможным осуществлять более чем один ионный пучок в одной и той же разделяющей магнитной области. Однако, эксперименты, связанные с этой последней проблемой, встретили ряд трудностей. Оказалось, что существуют ограничения как в количестве источников и приемников, которые можно поместить в одной и той же установке, так и в силе тока, который может быть использован в каждом пучке без ухудшения разделения.

11.15. Очевидно, что для получения такого количества продукции, которое имеет военное значение, требуется много разделительных установок. Поэтому были изучены различные системы объединения групп установок в экономические аггрегаты. Была разработана схема, которая была использована в дальнейшем на действующих заводах и оказалась удовлетворительной.

ПРЕИМУЩЕСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

11.16. К сентябрю 1942 г. как газовая диффузия, так и центробежный способ разделения изотопов уже интенсивно изучались, и притом в течение более длительного периода, чем электромагнитный метод. Оба эти метода — газовая диффузия и центрифуга —

*) Постройка гигантского циклотрона была предпринята на частные средства, отпущенные Рокфеллеровским фондом. Для быстрого осуществления постройки требовалась сверхурочная работа с дополнительными расходами. Чтобы покрыть эти затраты, Рокфеллеровский фонд сделал дополнительные ассигнования.

казались пригодными для промышленного производства U-235, но требовали для успешного заводского разделения сотен ступеней. В действительности, значительных количеств U-235 получено не было. Промышленной установки для производства плутония также не было, и еще не была доказана возможность получать саморазвивающуюся цепную реакцию, необходимую для производства плутония. Но в случае электромагнитного метода, после успешного отделения количеств порядка миллиграмма, уже не возникали вопросы об осуществимости поставленной задачи с научной точки зрения. Если одна установка могла разделить 10 *мг* в день, 100 000 000 установок могли разделить одну тонну в день. Вопрос был в стоимости и во времени. Каждая установка должна была представлять собою сложное электромагнитное устройство, требующее высокого вакуума, высокого напряжения и сильных магнитных полей. Кроме того, прежде чем строить большие промышленные агрегаты, нужно было произвести исследовательскую и техническую разработку широкого масштаба. Требовалось также привлечь большое количество высококвалифицированных работников. В то время все это казалось очень дорогим, но вместе с тем представлялось надежным и относительно быстро выполнимым. Малые размеры отдельных установок давали то преимущество, что разработка могла продолжаться; нововведения могли быть сделаны в процессе постройки или, в известных пределах, после постройки, а производительность могла быть всегда увеличена постройкой новых установок.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ

11.17. Не располагая еще полными научными и техническими данными по всем методам и твердыми оценками стоимости, необходимо было принять решения по трем пунктам: 1) строить ли электромагнитный завод, 2) насколько большим должен быть этот завод, 3) на какой стадии разработок должен быть принят окончательный проект.

УТВЕРЖДЕНИЕ ПОСТРОЙКИ ЗАВОДА

11.18. На основании результатов, полученных из экспериментов в Беркли летом 1942 г., Исполнительный Комитет на заседании 13—14 сентября 1942 г. рекомендовал, чтобы Армия дала заказ

на постройку завода электромагнитного разделения в долине Тенесси (Клинтонский механический завод). Было рекомендовано пойти на то, что этот заказ в случае необходимости может быть аннулирован на основании данных, которые могут быть получены позднее. Была признана желательной постройка опытного завода в долине Тенесси в возможно более короткое время. (Эти рекомендации впоследствии были отменены, и опытный завод не был построен). Постройка производственной установки была утверждена генералом Гроувзом 5 ноября 1942 г. с условием, чтобы немедленно было прекращено проектирование опытной установки.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА

11.19. При описании производства плутония мы рассмотрели разделение обязанностей между Металлургической лабораторией и фирмой Дюпон. Организация проектирования и строительства завода электромагнитного разделения была основана на несколько ином принципе. Обязанности были распределены между шестью основными группами. Лаборатории излучения Калифорнийского университета были поручены исследования и техническая разработка; фирме Westinghouse Electric and Manufacturing Co. — производство механических частей источников, приемников, насосов, камер и т. д.; фирме General Electric Co. — электрическое оборудование и приборы управления; фирме Allis-Chalmers Co. — магниты; фирме Stone and Webster Engineering Co.—постройка и монтаж и фирме Tennessee Eastman Co. — эксплоатация. Все пять фирм держали группы своих инженеров в Беркли, благодаря чему осуществлялась повседневно деловая связь и взаимный контроль. Таким образом основная часть проектирования проводилась совместно, хотя детали могли быть оставлены для разработки отдельным фирмам.

ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

11.20. Следует отметить тот странный факт, что хотя теория котла с саморазвивающейся цепной реакцией была хорошо разработана всего за два года, теория газового разряда, после пятидесяти лет интенсивного изучения, была все еще недостаточна для точного предсказания поведения ионов в калютроне. Количество U-235, накопленного в день, и его чистота зависят от таких факто-

ров, как: (1) ширина, расположение и форма коллектора, (2) давление газа в магнитном пространстве, (3) напряженность и однородность магнитного поля, (4) форма и расположение определяющих щелей и ускоряющей системы, (5) ускоряющее напряжение, (6) размеры и форма щелей в дуговом источнике ионов, (7) ток дуги, (8) положение дуги внутри дуговой камеры, (9) давление пара в дуговой камере, (10) химическая природа пара. Для систематического изучения совместного действия всех этих факторов времени не было. Разработку приходилось вести в значительной мере по интуиции. Необходимо было изучить большое число разнообразных явлений и хотя бы частично их истолковать. Затем опыт, накопленный группой, и приобретенное «ощущение» проблемы нужно было превратить в конкретные проекты и указания.

НЕОБХОДИМЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

11.21. (а) *Число ступеней.* Как и во всех методах, приходилось искать компромисс между производительностью и коэффициентом разделения. В электромагнитной системе коэффициент разделения много выше, чем в других системах, так что необходимое количество ступеней мало. Вначале казалось возможным ограничиться одной ступенью, но уже первые исследования показали, что попытки повысить коэффициент разделения настолько, чтобы достаточно было одной ступени, приводили к снижению выхода до практически неприемлемой величины.

11.22. (а) *Технические условия.* Данные опытов по всем указанным выше факторам, определяющим работу разделительной установки, должны были перед началом строительства вылиться в решения по следующим основным пунктам: (1) размер установки, определяемый радиусом кривизны траектории иона, длина щели источника, устройство источников и приемников; (2) необходимая максимальная напряженность магнитного поля; (3) вопрос о том, нужно ли использовать ионные пучки с большой угловой расходимостью; (4) количество источников ионов и приемников на установку; (5) должен ли источник иметь высокий потенциал или потенциал земли; (6) количество ускоряющих электродов и максимальные потенциалы, приложенные к ним; (7) потребная мощность для дуг, для ускоряющего напряжения, для насосов и т. д.; (8) требования, предъявляемые к насосной уста-

новке; (9) количество установок на полюсной зазор; (10) количество установок в здании.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ В БЕРКЛИ

11.23. Разработка большей части проектов для первого завода в связи с результатами использования гигантского магнита в Беркли осенью 1942 г. должна была быть прекращена.

Однако, для проектируемого завода требовались установки несколько отличного типа. Хотя не было никаких оснований предполагать, что эти изменения повлияют на работу конструкции, было, очевидно, желательно построить модель установки в Беркли. Постройка ее была одобрена, примерно, в то же самое время, когда были заказаны первые установки для завода, так что опыт с ней не оказал влияния на основное проектирование. Эта установка была закончена и пущена в ход к апрелю 1943 г., т. е. за шесть месяцев до первой заводской установки, и принесла громадную пользу для целей испытаний и в деле обучения персонала. Позднее, в здании для большого магнита в Беркли был установлен третий магнит. Всего в Беркли было сосредоточено шесть разделительных установок, с помощью которых велось опытное производство и выполнялись исследования. Помимо завершения этих установок была также проделана большая вспомогательная работа.

ИЗОТРОННАЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

11.24. Как мы уже говорили, Г. Д. Смит стал изучать электромагнитные методы разделения в конце лета и осенью 1941 г. Его внимание в основном было направлено на метод использования широкого ионного источника и широкого ионного пучка вместо применяемых в калютроне узких пучков, ограниченных системой щелей. Метод, дающий разделение и использующий широкий источник ионов, был предложен Р. Р. Вильсоном (Принстон). Устройство, осуществленное по идее Вильсона, названо «изотроном».

11.25. Изотрон представляет собой масс-сепаратор, использующий широкий источник ионов, в отличие от щелевых источников, применяемых в обычных масс-спектрографах. Ионы от источника, имеющего большую поверхность, сперва ускоряются постоянным электрическим полем высокой интенсивности, а затем подвергаются действию слабого электрического поля высокой частоты, изме-

няющегося во времени пилообразно. Действие постоянного электрического поля заключается в том, чтобы направлять по трубе интенсивный пучок ионов, обладающих одинаковой кинетической энергией. Скорости ионов будут при этом обратно пропорциональны квадратным корням из их масс. С другой стороны, переменное электрическое поле создает малые периодические изменения в скорости ионов. Это изменение скоростей приводит к тому, что, пройдя в трубе определенное расстояние, ионы «сбиваются в группу» (тот же самый принцип использован в генераторе высокой частоты, носящем название клистрон, где электроны «сбиваются в группу» или «модулируются по скорости»). Группы ионов с различными массами движутся с различными скоростями и, поэтому, разделяются. В точке, где это происходит (в действительности на площади, перпендикулярной пучку), специальное анализирующее устройство создает поперечное фокусирующее электрическое поле с радиочастотной компонентой, синхронизированной с приходом групп ионов. Синхронизация такова, что переменная компонента напряженности поперечного поля равна нулю, когда проходит группа ионов U-235, и достигает максимума, когда проходит группа ионов U-238. Таким образом, ионы U-235 фокусируются на коллекторе, а ионы U-238 отклоняются.

11.26. Эта схема была изложена 18 декабря 1941 г. на заседании Комитета по урану и немедленно после этого была обсуждена более полно с Лоуренсом, который посетил Принстон. Казалось, что метод может дать удовлетворительные результаты, и имеет смысл начать его экспериментальную разработку. Она была немедленно начата по контракту с ОСРД и продолжалась до февраля 1943 г. Так как идея была совершенно новая, возникли два основные вопроса: (1) возможна ли вообще работа на этом принципе и (2) может ли этот метод быть развит достаточно быстро для производства в промышленном масштабе, чтобы конкурировать с более «ортодоксальными» методами, уже разрабатывавшимися в то время.

11.27. Экспериментальный изотрон был построен и пущен в ход к концу января 1942 г. Предварительные эксперименты, проведенные в то время, показали, что изотопы лития могут быть разделены этим методом. Первое успешное частичное разделение изотопов урана было осуществлено весной 1942 г.

11.28. К сожалению, в течение лета и конца 1942 г. работа развивалась не так быстро, как это предполагалось вначале. Поэтому, было решено приостановить эти работы в Принстоне и направить работников в лабораторию атомных бомб. Перед тем, как группа покинула Принстон, на небольшом экспериментальном изотроне она все же получила несколько образцов частично разделенного урана. Таким образом метод «действовал», но возможности применения его в широком масштабе не были еще полностью исследованы.

МАГНЕТРОН И ИОННАЯ ЦЕНТРИФУГА

11.29. В декабре 1941 г. при обсуждении всей проблемы разделения изотопов в Беркли было предложено использовать магнетрон в качестве масс-сепаратора. Тем временем Смит из Принстонского университета связался с Л. П. Смитом из Корнельского университета и обнаружил, что последний и его студенты провели с успехом значительную работу по разделению изотопов лития точно таким же методом. Об этом было сообщено Лоуренсу в Вашингтоне в декабре 1941 г. на заседании Комитета по урану. Лоуренс немедленно связался со Смитом. После этого (с февраля по июль 1941 г.) Смит работал над данным методом в Беркли. Дж. Слепян из исследовательской лаборатории Вестингауза в Ист-Питсбурге прибыл по приглашению Лоуренса в Беркли зимой 1941-42 гг. и стал работать над модификацией магнетрона, которую он назвал ионной центрифугой. Слепян оставался в Беркли большую часть времени до конца 1942 г., после чего вернулся в Ист-Питсбург, где продолжал ту же работу.

11.30. Попыток разделения урана с помощью магнетрона в действительности предпринято не было. Эксперименты с литием при малой силе ионного тока дали некоторое разделение, но с сильными ионными токами никаких определенных результатов получено не было. При применении ионной центрифуги были собраны образцы урана, показывающие заметное разделение, но результаты были неясны или противоречивы.

ПОЛОЖЕНИЕ К НАЧАЛУ 1943 г.

11.31. С исключением из программы изотрона и ионной центрифуги калютронный разделитель остался единственным вариан-

том электромагнитного метода, который интенсивно разрабатывался. Постройка первых установок завода была утверждена, и была выбрана их окончательная конструкция. Так как все работы по электромагнитному методу велись немного больше года, было очевидно, что имевшиеся проекты основывались скорее на проницательных догадках, чем на систематических исследованиях. Подобная ситуация могла бы возникнуть с котлом для цепных реакций, если бы можно было получить неограниченные количества урана и графита прежде, чем была разработана теория и достаточно хорошо определены ядерные постоянные. К счастью, характер обоих проектов был весьма различен, что делало ускоренную постройку электромагнитного завода менее рискованной, чем это было бы в случае котла. Дальнейшие исследования и разработка могли успешно продолжаться даже если бы первые установки завода были построены и уже работали.

СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛОАТАЦИЯ; МАРТ 1943 г. — ИЮНЬ 1945 г.

СРАВНЕНИЕ С ДИФФУЗИОННЫМ И ПЛУТОНИЕВЫМ ЗАВОДАМИ

11.32. В предыдущих главах говорилось, что в конце 1942 г. были приняты решения, охватывающие весь проект по урану. Действительно, именно в это время впервые была получена саморазвивающаяся цепная реакция, и были утверждены проекты строительства плутониевого завода в Хэнфорде, диффузионного завода в Клинтоне и завода по электромагнитному разделению в Клинтоне. Диффузионный завод был более гибким, чем плутониевый, так как мог быть разбит на секции и ступени, мог быть построен целиком или частями и мог производить различные количества U-235 с различной степенью обогащения. Завод электромагнитного разделения был еще более гибкий, так как каждая разделительная установка была практически независима от других установок. Процесс разделения состоял в загрузке установки, работе ее в течение некоторого времени, последующей остановке и извлечении продукции. Отдельные установки можно было располагать группами, сохранив независимость большей части органов управления для каждой из них.

Эта особенность сделала возможной постройку завода после-

довательными ступенями и позволила начать работу первой части до начала постройки второй. Можно было также изменять конструкцию последующих установок по мере развертывания строительства; в известных пределах можно было даже заменять устаревшие установки в ранних группах новыми, улучшенными экземплярами.

ХАРАКТЕР И ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК

11.33. Первая серия электромагнитных установок в Клинтоне была начата постройкой в марте и была готова к работе в ноябре 1943 г. Группа в Беркли продолжала улучшать источники ионов, приемники и вспомогательное оборудование, все время имея целью дальнейшее увеличение ионного тока. В сообщениях из Беркли было описано не менее 71 источника различного типа и 115 различных типов приемников, причем все они были доведены до стадии проекта, а большая часть построена и испытана. Как только ценность того или иного видоизменения была доказана, прилагались все усилия, чтобы включить его в конструкцию новых установок.

11.34. Строительство такого типа требовало постоянного обмена информацией между работниками лабораторий, инженерно-техническим персоналом и строительной и эксплоатационной группами. К счастью, связь была превосходна. В Беркли постоянно находились представители фирм, а работники исследовательских групп в Беркли совершали частые и продолжительные поездки на завод в Клинтоне. Некоторые из исследовательских работников были включены в штаты фирмы Тенесси Истмен, эксплоатирующей завод в Клинтоне, а группа свыше 100 человек физиков и инженеров-исследователей, остававшаяся в штатах лаборатории Беркли, была прикомандирована к Клинтону. Сотрудники из Беркли, находившиеся в Клинтоне, были неоценимы в качестве инструкторов, особенно на ранних стадиях работы. Часть завода продолжала работать в качестве опытного предприятия для испытания усовершенствованного оборудования и для проверки видоизмененных производственных процессов, и эксплоатировалась совместно группой из Беркли и фирмой Тенесси Истмен. Кроме уже упомянутой английской группы под руководством Оли-

фанта, была также английская группа химиков под руководством Дж. В. Бэкстера.

ХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

11.35. Соли урана, применявшиеся первоначально в качестве источника пара для дуговых ионных источников, не были исследованы в Беркли с достаточной полнотой. Однако, в дальнейшем над этими солями была проведена очень большая работа. Были произведены поиски новых соединений урана, и выполнено несколько ценных работ по способам получения выбранных соединений.

11.36. Гораздо более важной химической проблемой было извлечение переработанных соединений урана из разделительных установок. Эта проблема извлечения имела две фазы. В установках первой ступени было существенно извлечь с максимальной эффективностью отделенный уран из приемников; извлечение рассеянного неразделенного урана из других частей установки было менее важно. Но в установках более высоких ступеней даже исходное вещество содержит U-235 высокой концентрации, и поэтому важно извлекать в конце каждого цикла работы весь материал, т. е. материал, остающийся в источнике ионов, осевший на ускоряющих электродах, на стенках магнитной камеры и на стенках приемников.

ЗАВОД ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ

11.37. В течение почти года единственным действующим был завод электромагнитного разделения. Поэтому, потребность в увеличении его продукции была очень велика. Было установлено, что любой метод обогащения (хотя бы и небольшого) исходного материала значительно увеличит производительность завода. Если, например, электромагнитная установка может произвести в сутки один грамм U-235 40%-ной чистоты из естественного урана, то при повышении концентрации U-235 в исходном материале вдвое против естественной (1,4% вместо 0,7%) та же установка сможет производить в сутки 2 грамма U-235 80% чистоты.

11.38. Мы уже касались работы, проделанной П. Г. Абельсоном (Морская исследовательская лаборатория), по разделению изотопов урана термодиффузией в жидких соединениях урана.

Весной 1943 г. Абельсон собрал опытную производственную установку, которая производила заметное разделение значительного количества вещества. Поэтому было выдвинуто предложение о постройке термодиффузионного завода. Такой завод был бы дешевле, чем любой другой, и мог быть построен более быстро. Его принципиальным недостатком является чрезвычайно большое потребление пара. Этот основной недостаток приводил к тому, что для полного разделения изотопов термодиффузионный завод являлся бы непрактичным.

11.39. Кроме уже действовавшей опытной установки в Морской исследовательской лаборатории, строилась установка больших размеров на Морской верфи в Филадельфии. Сотрудничество флота сделало доступными для Манхэттенского Округа как работы Абельсона, так и проекты завода. Было решено построить термодиффузионный завод в Клинтоне (используя пар от теплосиловой станции, построенной для завода газовой диффузии) и использовать продукцию термодиффузионных установок в качестве сырья для электромагнитных разделений.

11.40. Этот новый термодиффузионный завод был построен в удивительно короткий срок, в течение конца лета 1944 г. Его работа, несмотря на некоторые недостатки, привела к значительному увеличению продукции электромагнитного завода. Это также стимулировало работу над проблемой извлечения урана. Будущее термодиффузионного завода неопределенно. Работа завода газовой диффузии создает перебои в подаче достаточного количества пара для термодиффузионного разделения. В то же время завод газовой диффузии сам является потребителем продукции термодиффузионного завода.

РАЗНЫЕ ВОПРОСЫ

11.41. Хотя научные и технические задачи, с которыми столкнулись группы в Беркли, были, пожалуй, не так разнообразны и многочисленны, как задачи, встретившиеся в Чикаго и Колумбии, все же их было достаточно много. Много проблем возникло также при проектировании электросилового хозяйства, схем управления, магнитов, изоляторов, вакуумных насосов, камер, коллекторов и источников. Многие детали оборудования приходилось

конструировать на основании схематических эскизов и пускать преждевременно в массовое производство.

СОВРЕМЕННОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

11.42. Завод электромагнитного разделения развил производство в большом масштабе в течение зимы 1944—1945 г. и производил U-235 достаточной чистоты для применения в атомных бомбах. Его производительность непрерывно повышалась. Исследовательская работа продолжается, хотя и в уменьшенном масштабе.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ

11.43. В первые дни работы над проектом по урану электромагнитный метод разделения изотопов был отвергнут, главным образом, из-за предполагавшегося влияния объемного заряда. Осенью 1941 г. вопрос был поднят снова; эксперименты в Беркли показали, что вредное влияние объемного заряда можно в значительной степени уменьшить. В связи с этим была предпринята широкая разработка применения электромагнитного метода.

11.44. Из различных вариантов электромагнитного метода основное внимание заслужил калютрон (разработанный в Беркли). Кроме того, подверглись изучению две другие новые схемы, — одна в Беркли, другая в Принстоне. Калютронный разделитель изотопов состоит из источника ионов, испускающего под действием электрического поля пучок ионов урана, ускоряющей системы, в которой ионы приобретают большие скорости, магнитного поля, в котором ионы движутся по полуокружностям с радиусами, зависящими от массы ионов, и приемной системы. Основными проблемами здесь явились: источник ионов, ускоряющая система, угол раскрытия ионного пучка, объемный заряд и использование магнитного поля. Основными преимуществами калютрона были: большой коэффициент разделения, малая загрузка, короткий пусковой период и гибкость в работе. К осени 1942 г. достигнутые результаты позволили утвердить проект постройки завода, и годом позднее первые заводские установки в Клинтоне были готовы для испытания.

11.45. Исследования и техническая разработка калютрона были выполнены, главным образом, в лаборатории излучения Калифор-

нийского университета под руководством Лоуренса. Фирмы Вестингауз, Дженерал Электрик и Аллис-Чалмерс изготовили большинство частей, фирма Стоун и Вебстер строила завод, а фирма Тенесси Истмен эксплоатировала его.

11.46. Так как завод для разделения с помощью калютрона состоит из большого количества в значительной степени независимых аггрегатов одного и того же типа, было возможно вводить важные улучшения даже после начала работы завода.

11.47. Летом 1944 г. при Механическом заводе в Клинтоне был построен термодиффузионный завод, который должен был вырабатывать обогащенное сырье для электромагнитных разделителей и, тем самым, повысить их производительность. Проектирование термодиффузионного завода основывалось на результатах исследований, проведенных в Морской исследовательской лаборатории, и на работе опытной установки, построенной Военно-морским министерством на верфи Филадельфии.

11.48. Хотя исследовательская работа с калютроном была начата позднее, чем с центрифугами и диффузионными установками, завод, использующий установки типа калютрона, первый стал производить в больших количествах разделенные изотопы урана.

ГЛАВА XII

РАБОТА НАД АТОМНОЙ БОМБОЙ

ПЛАН ГЛАВЫ

12.1. Общая цель работы, описанной в предыдущих главах — исследовать возможность создания атомных бомб и производства концентрированных, способных испытывать деление материалов, требующихся для таких бомб. В настоящей главе будет описана последняя стадия работы—техническая разработка в Лос-Аламосе самой атомной бомбы. Как и в других частях Проекта, здесь должны быть рассмотрены две фазы: организация дела и собственно научно-техническая работа. Организация будет описана кратко, остальная же часть главы посвящена научным и техническим проблемам. Естественно, что соображения секретности не допускают обсуждения многих из наиболее важных фаз этой работы.

ИСТОРИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ

12.2. Проект реорганизации, имевшей место в начале 1942 г., и последующая постепенная передача дела, находившегося в ведении ОСРД, Манхэттенскому Округу были описаны в главе V. Напомним, что изучение физики атомной бомбы сперва входило в обязанности Металлургической лаборатории в Чикаго. Некоторые предварительные исследования были проделаны в 1941 г. В начале 1942 г. Г. Брейт организовал в нескольких лабораториях (см. 6.38) работу по экспериментальному исследованию вопросов, которые должны были быть разрешены еще до получения каких-либо результатов в области конструирования бомбы. Как уже упоминалось в главе VI, профессор Калифорнийского университета И. Р. Оппенгеймер собрал летом 1942 г. группу для дальней-

ших теоретических исследований, а также взял на себя согласование экспериментальных работ. Официально эта группа числилась при Металлургической лаборатории, но теоретическая группа большую часть работы провела в Калифорнийском университете. К концу лета 1942 г., когда руководство всем Проектом принял на себя генерал Л. Р. Гроувз, было решено значительно расширить работу и как можно скорее построить отдельную лабораторию.

12.3. При выборе участка для лаборатории атомных бомб на первом месте стояли соображения секретности и безопасности для населения. Поэтому решено было строить лабораторию в уединенном месте и отрезать всякую излишнюю связь с внешним миром.

12.4. К ноябрю 1942 г. место постройки было выбрано в Лос-Аламосе (Нью Мексико). Оно было расположено на плато, приблизительно в 30 милях от Санта-Фе. Преимуществом этого места было наличие значительной площади для производства испытаний, но вначале единственными сооружениями на участке было несколько строений, когда-то представлявших собой небольшую школу. Не было ни лаборатории, ни библиотеки, ни мастерской, ни соответствующего силового хозяйства. Единственным средством связи с внешним миром служила извилистая горная дорога. Преодоление всех трудностей, связанных с местными условиями, было в значительной степени результатом напряженной работы научного и военного персонала.

12.5. Директором лаборатории с самого начала стал И. Р. Оппенгеймер. Он прибыл на участок в марте 1943 г. и вскоре к нему присоединились группы и отдельные работники Принстонского, Чикагского, Калифорнийского, Висконсинского и Миннезотского университетов и других мест. Пользуясь энергичной поддержкой генерала Гроувза, Дж. Конанта и других, Оппенгеймер продолжал объединять вокруг себя виднейших ученых, так что конец 1944 г. застал необычайную плеяду светил ученого мира, собранных на плато в Нью Мексико. Комплектование младшего научного и технического персонала оказалось делом более трудным, так как для таких лиц неудобства места работы не всегда уравновешивались сознанием величия цели. Использование специального инженерного отряда значительно улучшило положение.

12.6. Естественно, что задача собирания необходимой аппара-

туры, машин и оборудования оказалась огромной. Три грузовика с аппаратурой из Принстона удовлетворили часть наиболее острых потребностей. Вскоре прибыли циклотрон из Гарварда, два генератора Ван-де-Граафа из Висконсина и высоковольтная установка Кокрофта-Уолтона из Иллинойса. В качестве иллюстрации быстроты, с которой была создана лаборатория, мы можем отметить, что нижний полюс электромагнита циклотрона был установлен 14 апреля 1943 г., а в начале июля уже проводился первый эксперимент. Приобреталось множество других приборов, были выстроены вспомогательные лаборатории, и в настоящее время эта лаборатория является, по всей вероятности, лучшей в мире по своему оборудованию физической лабораторией.

12.7. Лаборатория финансировалась по договору, заключенному между Манхэттенским Округом и Калифорнийским университетом.

УРОВЕНЬ ЗНАНИЙ В АПРЕЛЕ 1943 ГОДА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ

12.8. В главе II мы установили общие условия, необходимые для получения саморазвивающейся цепной реакции. Было указано, что имеются четыре взаимно конкурирующих процесса, в которых принимают участие нейтроны: (1) захват нейтронов ураном, приводящий к делению последнего; (2) захват нейтронов ураном без деления; (3) захват примесями и (4) вылет нейтронов из системы. Условием получения такой цепной реакции служит то, что в процессе (1) будет возникать столько же новых нейтронов, сколько их расходуется или теряется во всех четырех процессах, вместе взятых. Указывалось, что процесс (2) можно ослабить устранением изотопа U-238 или применением решетки и замедлителя; процесс (3) можно ослабить достижением высокой степени химической чистоты; процесс же (4) можно ослабить (относительно) увеличением размеров системы. В наших прежних обсуждениях цепных реакций всегда предполагалось, что цепная реакция не должна сопровождаться взрывом системы. Теперь же мы хотим посмотреть, что надо сделать, чтобы заставить систему взорваться.

12.9. По определению, взрыв есть внезапное и бурное выде-

ление (в небольшом объеме) большого количества энергии. Для эффективного взрыва атомной бомбы части ее не должны заметно отодвинуться друг от друга, прежде чем выделится значительная часть имеющейся в наличии ядерной энергии, так как расширение приводит к увеличению вылета нейтронов из системы и следовательно, к преждевременному прекращению цепной реакции. Иначе говоря, эффективность атомной бомбы зависит от отношения: (a) скорости, с которой нейтроны, освобожденные первыми делениями, проникают в другие ядра и вызывают дальнейшие деления и (b) скорости, с которой бомба разлетается на части. Пользуясь известными законами выделения энергии, повышения температуры и давления, расширения твердых тел и газов, можно было оценить порядок промежутка времени между началом и концом ядерной цепной реакции. Почти все технические трудности Проекта связаны с необычайной малостью этого интервала.

12.10. В предыдущих главах мы установили, что саморазвивающаяся цепная реакция не может быть вызвана в массе чистого металлического урана, независимо от ее размеров, из-за паразитного захвата нейтронов ураном-238. Это заключение было результатом различных теоретических вычислений, а также прямого эксперимента. Чтобы получить невзрывающийся котел, можно применить решетку и замедлитель, что в достаточной мере уменьшает паразитные захваты. Для осуществления взрывающейся системы этот прием, как оказалось, неудовлетворителен в двух отношениях. Во-первых, процесс на тепловых нейтронах развивается столь медленно, что в результате получился бы лишь слабый взрыв. Во-вторых, котел получается слишком большим для транспортировки. Поэтому для осуществления взрывающейся системы необходимо исключить паразитный захват, удалив большую часть U-238, или применив плутоний.

12.11. Эти общие положения, как и многие другие, были твердо установлены еще до возникновения Лос-Аламосского проекта.

КРИТИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ

12.12. Вычисление критических размеров является проблемой, которую мы уже обсуждали в связи с вопросом о котлах. Хотя расчет для однородного металла проще, чем для решетки, но в начальном периоде работы оставались неточности, обусловленные

как недостаточно точным знанием постоянных, так и математическими трудностями. Так, поперечные сечения рассеяния, деления и поглощения нейтронов ядрами, участвующими в реакции, меняются со скоростью нейтронов. Детали этих изменений не были известны экспериментально и крайне трудно учитывались при расчетах. Весной 1943 г. на основе использования различных методов вычисления и наиболее надежных ядерных постоянных были высказаны некоторые суждения о критических размерах, но все же пределы ошибок оставались большими.

ОТРАЖАЮЩАЯ ОБОЛОЧКА

12.13. Критические размеры урано-графитового котла могут быть значительно уменьшены, если он окружен слоем графита, так как эта оболочка «отражает» много нейтронов обратно в котел. Подобную оболочку можно применить и для уменьшения критических размеров бомбы, однако, здесь она играет еще дополнительную роль: ее собственная инерция задерживает расширение реагирующего материала. Применение ее приводит к более длительному, более энергичному и эффективному взрыву. Наиболее эффективной является оболочка, имеющая максимальную плотность; высокая прочность на разрыв оказывается несущественной. Благодаря счастливому совпадению, материалы высокой плотности одновременно являются и превосходными отражателями нейтронов.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

12.14. Как уже отмечалось выше, бомба во время реакции стремится разлететься на куски, что ведет к прекращению реакции. Подсчет, насколько должна расшириться бомба, прежде чем реакция прекратится, относительно прост. Подсчет же времени этого расширения и сколь далеко заходит за это время реакция— гораздо труднее.

12.15. Оболочка должна увеличивать коэффициент полезного действия как из-за отражения нейтронов, так и из-за задержки в расширении бомбы, но оказывается, что ее действие на КПД не столь велико, как на критическую массу. Причина этого в том, что процесс отражения требует относительно большого времени и не может широко развиться до момента окончания реакции.

ДЕТОНАЦИЯ И СБЛИЖЕНИЕ ЧАСТЕЙ БОМБЫ

12.16. Как было установлено в главе II, невозможно предотвратить возникновение цепной реакции, если размеры бомбы превосходят критические. Дело в том, что всегда имеется достаточно нейтронов для начала цепной реакции (нейтроны от космических лучей, от спонтанных делений или от реакций в примесях, вызванных α-частицами). Таким образом, пока детонация нежелательна, бомба должна состоять из некоторого числа отдельных частей, каждая из которых меньше критической (или по малости геометрических размеров, или вследствие неподходящей формы). Чтобы вызвать детонацию, отдельные части бомбы нужно сблизить достаточно быстро вместе. Из-за присутствия блуждающих нейтронов цепная реакция может начаться уже во время этого сближения, еще до того момента, как бомба достигла наиболее компактной, т. е. наиболее благоприятной для реакции формы. В этом случае взрыв будет мешать бомбе достигнуть этой наиболее компактной формы. Может случиться, что он будет совсем неэффективен. Возникает поэтому двойная задача: (1) уменьшить до минимума время сближения частей бомбы и (2) уменьшить до минимума число блуждающих нейтронов.

12.17. Опасность получения «хлопка́», т. е. детонации столь малой эффективности, что даже сама бомба окажется разрушенной неполностью, также подвергалась рассмотрению. Это было бы, конечно, весьма нежелательно, так как дало бы в руки врага запас весьма ценного материала.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ

12.18. В главах II и IV указывалось, что количество выделяющейся энергии не является единственным критерием ценности бомбы. Нет никакой уверенности в том, что урановая бомба, выделяющая энергию, равную энергии взрыва 20 000 тонн тринитротолуола, будет столь же эффективна в отношении вызываемых ею разрушений, как, скажем, 10 000 двухтонных бомб. Есть основания думать, что разрушительное действие на каждую освобождаемую калорию уменьшается с увеличением общего количества освобождающейся энергии. С другой стороны, в атомных бомбах общее количество освобождающейся энергии на килограмм делящегося материала (т. е. КПД освобождаемой энергии) увеличи-

вается вместе с размерами бомбы. Таким образом, определить оптимальные размеры атомной бомбы оказалось нелегко. Вопрос усложняется еще тем, что, с точки зрения тактики, существенным преимуществом является возможность мгновенного разрушения большой площади вражеской территории. При полной оценке эффективности атомной бомбы необходимо учитывать и ее действие на психику *).

В боевой обстановке бомба взрывается на такой высоте от поверхности земли, с которой она могла бы оказать максимальное разрушающее действие на здания и рассеять в виде облака радиоактивные продукты взрыва. Учитывая высоту взрыва, можно считать, что практически все радиоактивные продукты будут уноситься вверх восходящим потоком горячего воздуха и рассеиваться без вреда на большой территории. Даже при испытании в Нью Мексико, где высота взрыва была по необходимости мала, лишь очень небольшая доля радиоактивных продуктов осела непосредственно под бомбой.

МЕТОД СБЛИЖЕНИЯ ЧАСТЕЙ БОМБЫ

12.19. Ввиду того, что скорости, с которыми субкритические массы U-235 во избежание преждевременной детонации должны сближаться в одно целое, по оценкам очень велики, потребовалось много усилий для практического осуществления этого. Очевидным методом быстрого сближения частей атомной бомбы был выстрел одной частью бомбы, как снарядом, в другую часть бомбы, как мишень. Масса и скорость снаряда, а также калибр орудия недалеки от тех, какие применяются в обычной артиллерийской практике; однако, здесь возникли и новые проблемы, связанные с важностью получения мгновенного и совершенного контакта между снарядом и мишенью, применением оболочек и требованиями транспортировки. Ни одна из этих технических задач не была изучена хоть сколько-нибудь достаточно до организации лаборатории в Лос-Аламосе.

12.20. Выяснилось, что возможно предложить схемы, где поглотители нейтронов были бы заключены в бомбе так, чтобы ней-

*) Остальная часть параграфа взята из сообщения Военного министерства по поводу первого применения атомной бомбы против Японии.

троны играли меньшую роль в начальных стадиях цепной реакции. Тенденция к преждевременной и неэффективной детонации бомбы в этом случае сводится к минимуму. Такие устройства для увеличения коэффициента полезного действия бомбы называются автокаталитическими.

ХАРАКТЕРИСТИКА УРОВНЯ ЗНАНИЙ К АПРЕЛЮ 1943 г.

12.21. В апреле 1943 г. сколько-нибудь ценные и интересные сведения о конструкции атомных бомб были предварительны и неточны. Настоятельно требовалась дальнейшая и интенсивная теоретическая работа по критическим размерам, коэффициенту полезного действия, влиянию оболочки, эффективности и методу детонации. Должны были быть продолжены и улучшены измерения ядерных постоянных U-235, плутония и вещества оболочки. В отношении U-235 и плутония должны были производиться лишь предварительные измерения, с ничтожными количествами материала, пока в распоряжении не оказались большие количества.

12.22. Помимо указанных задач в области теоретической и экспериментальной физики, оставалось множество химических, металлургических и технических задач, которые еще почти не были затронуты. Таковы, например, очистка и производство U-235 и плутония и изготовление оболочки. Наконец, были задачи, связанные с мгновенным сближением частей бомбы, ошеломляющие по своей сложности.

РАБОТА ЛАБОРАТОРИИ

ВВЕДЕНИЕ

12.23. Весь научный персонал в Лос-Аламосе был разделен на 7 отделов, которые потом в разное время реорганизовывались. Весной 1945 года существовали следующие отделы:

1) теоретической физики, под руководством Г. Бете;

2) экспериментальной ядерной физики, под руководством Р. Р. Вильсона;

3) химии и металлургии, под руководством Дж. В. Кеннеди и К. С. Смита;

4) артиллерии, под руководством капитана В. С. Парсонса;

5) взрывчатых веществ, под руководством Г. Б. Кистяковского;

6) физики бомбы, под руководством Р. Ф. Бэчера;

7) перспективной разработки, под руководством Э. Ферми.

Все секции отчитывались перед И. Р. Оппенгеймером, директором Лос-Аламосской лаборатории, которому с декабря 1944 г. в координировании исследовательских работ стал помогать С. К. Алисон. Дж. Чэдвик (Англия) и Н. Бор (Дания) провели много времени в Лос-Аламосе и оказали неоценимую помощь. Чэдвик возглавлял английскую делегацию, которая существенно способствовала успеху лаборатории. Из соображений секретности большая часть работ лаборатории может быть описана лишь частично.

ОТДЕЛ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

12.24. Два обстоятельства придали необычайную важность работе отдела теоретической физики, руководимого Г. Бете. Первым из них была необходимость одновременного развертывания всех работ, начиная от основных материалов и кончая методом их использования — несмотря на фактическую недоступность главных материалов (U-235 и плутония) и полную новизну процессов. Вторым обстоятельством была невозможность производить атомные взрывы в малых масштабах (например, для экспериментальных целей), оперируя лишь с очень малыми количествами материала, способного к делению. Если его масса не превышает критической величины, то взрыва не происходит совсем. Таким образом для того, чтобы высказать суждения о том, что может произойти в бомбе, оставалось только исходить из данных эксперимента над бесконечно малыми количествами веществ и сочетать их сколь возможно точно с существующими теориями. Только таким путем и оказывалось возможным разумно планировать другие части Проекта и принимать решения по конструированию и постройке бомбы, не ожидая детальных экспериментов с большими количествами материала. Так, теоретическая работа была необходима для грубой оценки размеров орудия, для помощи металлургам в выборе вещества оболочки и для определения влияния чистоты испытывающего деление вещества на КПД бомбы.

12.25. Определение критических размеров бомбы было одной из главных задач отдела теоретической физики. С течением времени теоретические представления уточнялись, благодаря чему оказалось возможным учесть практически все сложные явления,

связанные с взрывом атомной бомбы. Сперва, например, принималось, что диффузия нейтронов аналогична диффузии тепла, но эту наивную аналогию пришлось оставить. В первоначальной теоретической работе предполагалось также, что все нейтроны имеют одинаковую скорость и рассеиваются изотропно. Таким образом, был разработан метод, допускавший вычисление критических размеров для различных (геометрических) форм испытывающего деление материала в предположении, что средняя длина свободного пробега нейтрона в нем и в веществе оболочки одна и та же. Позднее этот метод был усовершенствован; были учтены законы распределения по углам при рассеянии нейтронов и различие средних свободных пробегов нейтронов в веществе сердечника и оболочке бомбы. Еще позднее были найдены средства учитывать влияние распределения скоростей нейтронов, изменения поперечных сечений со скоростью и неупругого рассеяния в веществе сердечника и оболочки. Таким путем оказалось возможным подсчитать критические размеры почти при любом материале оболочки.

12.26. Скорость, с которой плотность нейтронов убывает в веществе бомбы при размерах, меньших критических, может быть вычислена с учетом всех упомянутых выше обстоятельств. Скорость приближения к критическим условиям, когда снарядная часть бомбы движется по направлению к другой части бомбы (к мишени), также изучалась теоретическими методами. Кроме того, теоретическими изысканиями было найдено и наилучшее распределение испытывающего деление материала в снаряде и в мишени.

12.27. Была разработана техника обращения с установками, в которых число нейтронов столь мало, что необходимо было провести тщательный статистический анализ действия нейтронов. Важнейшей задачей в этом направлении было определение вероятности того, что блуждающий нейтрон начнет непрерывную цепную реакцию для бомбы величины больше критической. Задачей, родственной предыдущей, было определение величины флуктуаций плотности нейтронов в бомбе, размеры которой в точности равны критическим. Летом 1945 года многие из таких вычислений были проверены на опыте.

12.28. Большая теоретическая работа была проведена по уравнению состояния вещества при высоких температурах и давле-

ниях, которых можно было ожидать при взрыве атомных бомб. Было подсчитано расширение различных частей, составляющих бомбу во время и по окончании цепной реакции; довольно детально было исследовано и действие излучения.

12.29. Когда была вычислена энергия, освобождающаяся при взрыве атомной бомбы, естественно, возникло желание оценить ее боевую эффективность. Сюда входит анализ ударных волн в воздухе и в земле, определение эффективности детонации под поверхностью океана и т. д.

12.30. В дополнение ко всему этому теоретический отдел провел значительную работу по анализу результатов предварительных экспериментов. Был произведен анализ обратного рассеяния нейтронов различными веществами оболочки. Проанализированы были также результаты экспериментов по увеличению числа нейтронов в субкритических количествах испытывающего деления вещества.

ОТДЕЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

12.31. Эксперименты, выполненные группой экспериментальной ядерной физики в Лос-Аламосе, были двух родов: «дифференциальные» эксперименты, например, по определению поперечного сечения деления определенного изотопа нейтронами определенной скорости, и «интегральные» эксперименты, например, по определению среднего рассеяния нейтронов, получающихся при делении, тем или иным веществом оболочки.

12.32. Много ядерных постоянных уже было определено в Металлургической лаборатории Чикагского университета и в других местах, однако, некоторое число важных постоянных оставалось еще неопределенным, особенно тех, которые связаны с большими скоростями нейтронов. Некоторые из важнейших вопросов, подлежавших изучению, приводятся ниже:

1) Каковы поперечные сечения деления U-234, U-235, U-238, Pu-239 и т. д.? Как они меняются со скоростью нейтронов?

2) Каковы поперечные сечения упругого рассеяния для тех же ядер и ядер вещества оболочки? Как они меняются со скоростью нейтронов?

3) Каковы поперечные сечения неупругого рассеяния для перечисленных выше ядер?

4) Каковы поперечные сечения поглощения для процессов иных, чем деление?

5) Сколько нейтронов испускается на деление каждого из названных выше ядер?

6) Чем объяснить, что количество нейтронов, испускаемых на деление, не есть целое число?

7) Какова начальная энергия нейтронов, вылетающих при делении?

8) Меняется ли число или энергия таких нейтронов со скоростью падающих нейтронов?

9) Испускаются ли нейтроны при делении немедленно?

10) Какова вероятность спонтанного деления различных ядер, способных к делению?

12.33. В дополнение к попыткам найти ответы на эти вопросы, Лос-Аламосский отдел экспериментальной ядерной физики исследовал многие проблемы, представляющие большой научный интерес, которые, как ожидалось, играют существенную роль для атомной бомбы. Будет ли это так или нет, накопленный отделом запас знаний является неоценимым вкладом в общую проблему атомного ядра.

12.34. *Экспериментальные методы.* Предыдущие главы почти или совсем не содержат описания экспериментальных методов, за исключением методов наблюдения быстрых заряженных частиц (см. Приложение 1). Для того, чтобы получить ответы на поставленные выше десять вопросов, мы должны иметь возможность:

1) определять число нейтронов любой заданной энергии;
2) получать нейтроны любой требуемой энергии;
3) определять углы отклонения рассеиваемых нейтронов;
4) определять число происходящих делений;
5) обнаруживать другие следствия поглощения нейтронов, например, искусственную радиоактивность.

Укажем вкратце, как осуществляются такие наблюдения.

12.35. *Обнаружение нейтронов.* Существуют три явления, при помощи которых можно обнаружить нейтроны:

1) ионизация, производимая ядрами легких атомов, приведенных в очень быстрое движение упругими соударениями с нейтронами;

2) радиоактивный распад неустойчивых ядер, образовавшихся в результате поглощения нейтронов;

3) деление в результате поглощения нейтронов.

Все три процесса приводят к образованию ионов, причем эта ионизация может быть обнаружена электроскопами, ионизационными камерами, счетчиками Гейгера-Мюллера, камерами Вильсона, следами в фотографической эмульсии и т. д.

12.36. Обнаружение нейтронов является делом нетрудным, измерение же их скоростей представляет значительно более сложную задачу. Метод камеры Вильсона и метод фотографической эмульсии приводят к наиболее непосредственным результатам, но их применение требует большого труда. Гораздо чаще применяются методы селективного поглощения. Если пленку из вещества, способного поглощать нейтроны с энергиями лишь одного определенного интервала, поместить на пути нейтронов и затем ее удалить, то степень радиоактивности пленки будет пропорциональна числу нейтронов с энергиями, заключающимися внутри этого интервала. Можно также изучать индуцированную радиоактивность, относительно которой известно, что она вызвана нейтронами, энергия которых лежит выше определенного порога.

12.37. Остроумной схемой изучения действия нейтронов с какой-либо одной произвольно выбранной скоростью является метод «времени полета». В этом методе источник нейтронов модулируется, т. е. устроен так, что эмиссия нейтронов происходит короткими «вспышками» или «импульсами». Каждый импульс содержит весьма большое количество нейтронов с очень широким диапазоном скоростей. Мишень и детектор расположены на значительном расстоянии от источника, в нескольких футах или ярдах от него. Детектор также «модулируется» с той же периодичностью, но со сдвигом фаз. Регулировка фаз производится так, что детектор реагирует лишь в течение короткого интервала времени, начинающегося спустя некоторое время после того, как пучок нейтронов покинул источник. Таким образом, любое действие, отмечаемое детектором (например, деление в слое урана, нанесенном на внутренней поверхности ионизационной камеры), производится лишь теми нейтронами, которые достигают детектора в точности к начальному моменту его работы и поэтому проходят весь путь от источника за определенный промежуток времени. Измеренные эф-

фекты, таким образом, будут обусловлены нейтронами, обладающими одной определенной скоростью.

12.38. *Получение нейтронов.* Все нейтроны получаются в результате ядерных реакций, и их начальная скорость зависит от баланса энергии. Если реакция эндотермична, т. е. если общая масса результирующих частиц больше массы исходных частиц, то реакция произойдет только в том случае, если бомбардирующие частицы обладают кинетической энергией, большей «пороговой энергии». При более высокой энергии бомбардировки, кинетическая энергия результирующих частиц, и в частности нейтронов, возрастает с повышением кинетической энергии бомбардирующих частиц над пороговым значением. Реакция Li^7 (p, n) Be^7 поглощает 1,6 MeV энергии, так как образующиеся частицы тяжелее исходных. Любая добавочная энергия падающих протонов переходит в кинетическую энергию продуктов реакции, так что максимальная скорость образовавшихся нейтронов повышается со скоростью падающих протонов. Для того, чтобы получить нейтроны с узким интервалом скоростей, нужно брать мишень малой толщины; протоны должны ударяться в мишень с одной и той же скоростью, а нейтроны необходимо наблюдать под определенным углом к пути падающих протонов.

12.39. Хотя к экзотермическим ядерным реакциям прилагаются те же законы сохранения энергии и количества движения, но выделяющаяся энергия обычно велика по сравнению с кинетической энергией бомбардирующих частиц и поэтому именно она определяет скорость нейтронов. Часто в одной и той же реакции получаются нейтроны разных энергий. Существуют реакции, дающие нейтроны с весьма большой энергией (близкой к 15 MeV).

12.40. Так как лишь небольшое число ядерных реакций применимо в качестве источника нейтронов, можно получить только определенные интервалы нейтронных скоростей. Не представляет никаких затруднений замедлить движение нейтронов, но невозможно сделать это замедление однородным, не расширяя интервала скоростей первоначальных нейтронов. Наиболее эффективным способом уменьшения скоростей нейтронов является применение замедлителя, как в случае графитового котла; этот котел сам по себе является превосходным источником тепловых или почти тепловых нейтронов с весьма малыми скоростями.

12.41. *Определение углов отклонения.* Трудности при измерении углов отклонения нейтронов в основном связаны с малой интенсивностью и ненадежностью интерпретации результатов опыта. Число нейтронов, рассеянных в каком-либо определенном направлении, может быть относительно мало, и «рассеянные» нейтроны почти всегда включают в себя много блуждающих нейтронов, возникающих при отражении от посторонних предметов.

12.42. *Определение числа делений.* Определение числа делений, производимых нейтронами или возникающих самопроизвольно, производится относительно просто. Здесь можно применять ионизационные камеры, счетчики и другие детекторы.

12.43. *Обнаружение продуктов захвата нейтронов.* Часто бывает желательно выяснить в деталях, что происходит с нейтронами, которые поглощаются, но не вызывают деления; примером может служить резонансный, или «радиационный» захват нейтронов ураном-238, превращающимся в U-239 и затем в плутоний. Подобные исследования обычно сводятся к микрохимическому разделению и изучению радиоактивности.

12.44. *Некоторые эксперименты по определению ядерных постоянных.* Ко времени постройки лаборатории в Лос-Аламосе была уже проведена большая работа по изучению взаимодействия медленных нейтронов с веществом. Так, было определено поперечное сечение деления обычного урана тепловыми нейтронами; такие же определения были сделаны и для отдельных изотопов урана и плутония. Были опубликованы данные по поперечным сечениям деления быстрыми нейтронами, а в лабораториях Проекта можно было получить и дополнительные сведения. Для расширения и уточнения всех этих данных в Лос-Аламосе применили генератор Ван-де-Граафа и, пользуясь реакцией Li^7 (p,n) Be^7, получали нейтроны любой энергии в пределах от 3000 eV до 2 000 000 eV. Был достигнут успех в модулировании циклотронного пучка и в разработке метода «времени полета» нейтронов для быстрого получения эффекта от многих интервалов скоростей. Были разработаны специальные методы для заполнения пробелов в энергетическом спектре нейтронов. Особенно важным были те уточнения, которые оказались возможными, когда U-235, U-238 и плутоний стали получаться в больших количествах. Для этих веществ были надежно определены значения поперечных

сечений деления, в зависимости от энергии нейтрона, в интервале от нуля до 3 000 000 eV.

12.45. *Некоторые «интегральные» эксперименты.* Можно описать два «интегральные» эксперимента, т. е. эксперименты над собранными в одно целое системами, содержащими испытывающий деление материал, отражатель и замедлитель. В первом из них была изучена система, содержавшая сравнительно большое количество U-235 в жидком растворе. Установка была рассчитана на работу при весьма малой мощности, поэтому охлаждения не было. Целью опыта была проверка явлений, предсказанных для систем, содержащих обогащенный U-235. Результаты опыта оказались близкими к ожидавшимся.

12.46. Второй интегральный эксперимент был произведен с котлом, содержавшим смесь урана и водородного замедлителя. В своей первоначальной форме установка представляла собою котел с цепной реакцией на медленных нейтронах. Затем котел был реконструирован с применением меньшего количества водорода. В этом варианте котла получило важное значение деление на быстрых нейтронах. Котел перестраивался еще несколько раз, причем всякий раз применялось все меньше водорода. Ряд таких реконструкций последовательно изменял характер реакции так, что деление на тепловых нейтронах играло все меньшую и меньшую роль, в то время как все большее значение приобретало деление на быстрых нейтронах, что приближало условия эксперимента к условиям, имеющим место в бомбе.

12.47. *Сводка результатов экспериментов по ядерной физике.* С приличной степенью точности были определены ядерные постоянные U-235, U-238 и плутония в диапазоне энергии нейтронов от тепловых до 3 000 000 eV. На вопросы 1, 2, 3, 4 и 5, из числа поставленных в начале настоящего раздела, ответы были получены. Спектр деления (вопрос 7) для U-235 и Pu-239 довольно хорошо известен. Спонтанное деление (вопрос 10) было изучено для нескольких типов ядер. Были получены также предварительные результаты по вопросам 6, 8 и 9.

ОТДЕЛ ХИМИИ И МЕТАЛЛУРГИИ

12.48. Отделом химии и металлургии в Лос-Аламосской лаборатории руководили совместно Дж. В. Кеннеди и К. С. Смит. На

ответственности отдела лежала окончательная очистка обогащенных материалов для деления, производство сердечника бомбы, оболочки и пр., а также ряд других вопросов. Во всей работе отдела над обогащенными способными к делению материалами должны были приниматься особые меры предосторожности, чтобы не терялись сколько-нибудь заметные количества материалов, которые были много дороже золота. Таким образом, приемы очистки и обращения с обычным ураном, которые были уже твердо установлены в Чикаго и в других местах, здесь часто оказывались недостаточными при манипуляциях с высоко обогащенными образцами U-235.

ОТДЕЛЫ АРТИЛЛЕРИИ, ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ И ФИЗИКИ БОМБЫ

12.49. Вышеприведенный отчет о работе отделов теоретической физики, экспериментальной ядерной физики, химии и металлургии очень неполон, так как многие важные стороны этой работы не могут обсуждаться из соображений секретности. По этим же причинам ни одна из работ отделов артиллерии, взрывчатых веществ и физики бомбы не может обсуждаться вовсе.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ

12.50. Весной 1943 г. в Лос-Аламосе (Нью Мексико) была организована под руководством И. Р. Оппенгеймера новая лаборатория для исследования, конструирования и постройки атомной бомбы. В новой лаборатории были изучены теоретические вопросы конструкции бомбы и методов ее изготовления, были уточнены и расширены измерения необходимых ядерных постоянных, разработаны методы очистки используемых материалов и, наконец, спроектированы и построены пригодные к действию атомные бомбы.

ГЛАВА XIII

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

13.1. В результате работы организаций Манхэттенского Округа в Вашингтоне и Тенесси, групп ученых в Беркли, Чикаго, Колумбии, Лос-Аламосе и в других местах, промышленных групп в Клинтоне, Хэнфорде и многих других местах, конец июня 1945 г. застает нас в ожидании сообщений со дня на день о взрыве первой атомной бомбы, изобретенной человеком. Все проблемы считаются разрешенными достаточно удовлетворительно, по крайней мере для того, чтобы бомба стала применимой на практике. Была доказана возможность самопроизвольной цепной реакции, обусловленной делением ядер нейтронами; было установлено, какие условия необходимы для того, чтобы такая реакция протекала в виде взрыва; эти условия могут быть осуществлены; промышленные установки нескольких различных типов уже работают, накопляя горы взрывчатого вещества. Хотя нам неизвестно, когда произойдет первый взрыв, и насколько эффективным он окажется, сообщение об этом событии будет предшествовать опубликованию данного отчета. Если даже первая попытка будет относительно не эффективной, то едва ли можно сомневаться, что последующие попытки дадут большой эффект; предполагают, что разрушения от одной бомбы будут сравнимы с разрушениями в результате мощного воздушного налета.

13.2. Создано оружие, по своему разрушительному действию превосходящее все, что можно себе вообразить; оружие, столь идеально приспособленное для внезапного мгновенного нападения, что крупнейшие города какой-либо страны могут быть в одну ночь уничтожены «дружественным» государством. Это оружие создано не дьявольским вдохновением какого-либо порочного ге-

ния, а самоотверженным трудом тысяч обыкновенных мужчин и женщин, работавших ради обеспечения безопасности своей родины. Многие из принципов, примененных здесь, были хорошо известны ученым во всем мире еще в 1940 году. Разработка нужных производственных процессов на основе этих принципов потребовала больших затрат времени, труда и денег, но выбранные процессы оказались действенными, так же, как оказались бы, вероятно, действенными и другие процессы, от которых мы отказались. Мы располагаем начальным преимуществом во времени, так как, насколько нам известно, другие страны не были в состоянии вести аналогичную работу в военное время. Мы обладаем также общим преимуществом в научных силах и особенно в промышленном развитии, но такое преимущество не является решающим.

13.3. До капитуляции Германии всегда существовала возможность того, что германские ученые и инженеры смогут создать атомные бомбы, которые окажутся достаточно эффективными, чтобы изменить ход войны. Поэтому, разумеется, ничего не оставалось, как работать над атомными бомбами в нашей стране. Вначале многие ученые могли надеяться и надеялись на то, что появится на свет какой-то принцип, согласно которому атомные бомбы по существу невозможны. Эта надежда постепенно исчезла. К счастью, в тот же период выявились огромные масштабы необходимых промышленных усилий, так что боязнь успехов немцев была ослаблена задолго до поражения Германии. По этой же причине большинство из нас убеждено, что японцы не смогут разработать и эффективно применить это оружие.

ПРОГНОЗЫ

13.4. Что касается будущего, можно догадываться, что техническое развитие пойдет по двум направлениям. С военной точки зрения вполне вероятно, что будут усовершенствованы как процессы производства испытывающих деление веществ, так и их применение. Возможно, что будут открыты совершенно иные методы превращения вещества в энергию, так как следует помнить, что энергия, освобождаемая при делении урана, соответствует использованию лишь около одной десятой процента его массы. Если бы была найдена схема превращения в энергию хотя бы

нескольких процентов массы какого-либо распространенного вещества, цивилизованный мир получил бы способ добровольно покончить с собой.

13.5. Возможные применения атомной энергии не все разрушительны, и второе направление, по которому может итти техническое развитие, — это мирный путь. Осенью 1944 года генерал Гроувз назначил комитет для изучения этих мирных возможностей, равно как и возможностей, имеющих военное значение [председатель—д-р Р. Ч. Толмэн; контрадмирал Э. В. Миллс (Военно-Морской Флот США) со своим уполномоченным, капитаном Т. А. Сольбергом, д-р У. К. Льюис и д-р Г. Д. Смит]. Комитет получил множество предложений, главным образом по линиям использования атомной энергии в силовых установках и применения радиоактивных побочных продуктов для научных, медицинских и промышленных целей. Все считали, что в конечном счете может возникнуть большая промышленность, сравнимая, быть может, с промышленностью электронных приборов, но мнения расходились по вопросу о том, насколько быстро будет такая промышленность развиваться; наконец все пришли к единодушному выводу, что в течение многих лет развитие будет итти медленно. По крайней мере, нет никаких непосредственных перспектив приводить в движение автомобили при помощи атомной энергии или освещать дома радиоактивными лампами, хотя вполне вероятно, что применение атомной энергии для специальных целей можно было бы развить в течение десяти лет, и что большая доступность радиоактивных веществ сможет в тот же срок оказать глубокое влияние на научные исследования и, возможно, на лечение некоторых болезней.

ПЛАНИРОВАНИЕ НА БУДУЩЕЕ

13.6. Во время войны все усилия были сосредоточены на достижении максимальных военных результатов. С некоторых пор стало ясно, что в какой-то мере контроль и поддержка правительством работ в области ядерной энергии должны продолжаться после войны. Многие из лиц, связанных с Проектом, сознавали это и выступали с различными предложениями; некоторые предложения были рассмотрены комитетом Толмэна, хотя это был лишь временный консультативный комитет, подчиненный генералу

Гроувзу. В настоящее время составлением планов для будущей организации занят Временный правительственный комитет. Этот комитет обсуждает также вопросы общеполитического значения, которые глубоко волновали вдумчивых людей с тех пор, как началась работа, особенно по мере того, как успех становился все более и более вероятным.

ВОПРОСЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПЕРЕД НАРОДОМ

13.7. Мы имеем дело со взрывчатым веществом, которое далеко еще несовершенно. Однако, грядущие возможности таких взрывчатых веществ ужасны, и их влияние на будущие войны и международные отношения необычайно велико. Перед нами новое орудие в руках человечества, орудие невообразимой разрушительной силы. Развитие этого орудия возбуждает многие вопросы, на которые надо ответить в недалеком будущем.

13.8. Вследствие ограничений, налагаемых требованиями сохранения военной тайны, нельзя было поставить такие вопросы на обсуждение народа или конгресса. Они серьезно изучались всеми участниками работы и бурно дебатировались учеными; о выводах, к которым пришли ученые, было сообщено высшим властям. Это — не научно-технические вопросы, это — политические и социальные вопросы, ответы на которые могут повлиять на многие поколения людей. Обдумывая ответы на них, люди, занимавшиеся Проектом, мыслили, как граждане Соединенных Штатов, существенно заинтересованные в благополучии всего человечества. Их обязанностью, как и обязанностью информированных высоко-ответственных правительственных чиновников, было смотреть за пределы нынешней войны и ее оружия и предвидеть возможные последствия этих открытий. Это — тяжелая ответственность. В свободной стране, подобной нашей, такие вопросы должны обсуждаться народом, и решения должны быть им приняты через своих представителей. Это — одна из причин опубликования настоящего отчета. Он является полуспециальным, и мы надеемся, что люди науки смогут воспользоваться им для того, чтобы помочь своим соотечественникам притти к разумным решениям. Наш народ, если ему предстоит благоразумно выполнить свой долг, должен быть информирован.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ БЫСТРЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

В главе I указывалось на значение ионизации в изучении радиоактивности и упоминалось об электроскопе. В настоящем приложении мы кратко остановимся на одном, уже не применяющемся методе, имеющем, как и электроскоп, только историческое значение. Затем мы перейдем к обзору различных методов, применяемых ныне для наблюдения α-частиц, β-частиц (или позитронов), γ-лучей и нейтронов, и их действий.

СЦИНТИЛЛЯЦИИ

Ближе всего можно подойти к «видению» атома, если наблюдать яркие вспышки света, производимые α-частицей или быстро летящим протоном при их ударе о флуоресцирующий экран. Для этого необходимо только иметь кусочек стекла, покрытого сернистым цинком, микроскоп с небольшим увеличением, темную комнату, хорошо отдохнувшие глаза и, разумеется, источник α-частиц. Большая часть знаменитых опытов Резерфорда, включая и те, которые упоминались в параграфе 1.17, была связана с «подсчетом» сцинтилляций, но этот метод утомителен и, насколько нам известно, полностью вытеснен электрическими методами.

ПРОЦЕСС ИОНИЗАЦИИ

Когда быстрая заряженная частица (α-частица, или быстрый электрон) проходит через вещество, она разрушает молекулы, с которыми сталкивается, благодаря электрическим силам, действующим между заряженной частицей и электронами в молекуле. Если вещество газообразно, то образовавшиеся в результате столкновений осколки или ионы движутся в разные стороны в электрическом поле; электроны, выбитые из молекул, движутся в одном

направлении, а оставшиеся положительные ионы — в другом. β-частица с энергией в миллион электрон-вольт произведет около 18 000 ионизованных атомов, прежде чем остановится, так как в среднем на каждое ионизующее столкновение она затрачивает энергию приблизительно в 60 вольт. Ввиду того, что в процессе ионизации образуются как положительные, так и отрицательные ионы, всего получается 36 000 зарядов, освобождаемых одним быстрым электроном. Так как каждый заряд составляет лишь $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кулонов, общий заряд будет около $6 \cdot 10^{-15}$ кулонов — величина все же весьма малая. При помощи наилучшего гальванометра можно измерить заряд около 10^{-10} кулонов. Чувствительность электрометра может быть доведена примерно до 10^{-16} кулонов, но электрометр — прибор, чрезвычайно неудобный для применения.

α-частица производит примерно такое же количество ионов, как и β-частица. Она быстрее останавливается, зато производит более значительное количество ионов на единицу длины пробега. γ-лучи в качестве ионизатора значительно менее эффективны. Благодаря комптоновскому рассеянию или фотоэлектрическому эффекту, γ-лучи вырывают из молекулы электрон, и эти вторичные электроны обладают достаточной энергией для того, чтобы вызывать ионизацию. Нейтрон, как говорилось выше, вызывает ионизацию лишь косвенно — осколками расщепляемых ядер или ядрами отдачи при упругих соударениях.

Если нам надо обнаружить ионизующее действие частиц, мы должны, очевидно, воспользоваться результирующим эффектом, вызываемым большим количеством этих частиц, или иметь очень чувствительные способы измерения электрических токов.

ЭЛЕКТРОСКОП

Электроскоп показывает, насколько непосредственно окружающий его воздух сделался электропроводным в результате образования в нем ионов.

Простейший электроскоп представляет собою золотой листочек длиной в несколько сантиметров, подвешенный на петле к вертикальному изолированному стержню. Когда стержень заряжается, золотой листочек, сложенный вдвое, получает тот же заряд, и оба его конца расходятся на некоторый угол вследствие отталки-

вания одноименных зарядов. По мере того, как заряд уменьшается, листочки постепенно опадают, и скорость их спадания является мерой проводимости окружающего воздуха.

Более надежный электроскоп был придуман К. К. Лауритсеном, который заменил золотой листочек кварцевой нитью. Вместо силы тяжести, в качестве восстанавливающей силы, он пользовался упругостью нити. Проводимость нити достигается тонким металлическим покрытием. Прибор заряжается, и нить, после первоначального отклонения, постепенно возвращается в исходное положение. Положение нити отмечается при помощи небольшого микроскопа.

Эти приборы могут изготовляться переносными, прочными и достаточно чувствительными. Они являются обычными стандартными приборами для определения интенсивности γ-излучения и, в частности, для предупреждения опасного облучения.

ИОНИЗАЦИОННЫЕ КАМЕРЫ

Ионизационная камера измеряет полное число произведенных в ней ионов. Она обычно состоит из двух плоских электродов, между которыми создается электрическое поле, достаточно сильное для того, чтобы притягивать к электродам все ионы прежде, чем они успеют рекомбинировать, но недостаточно сильное, чтобы производить вторичные ионы, как это имеет место в некоторых приборах, описанных ниже.

Применяя чувствительный усилитель, с помощью ионизационной камеры можно измерить даже ионизацию, вызываемую отдельной α-частицей. Ионизационная камера может применяться, подобно электроскопу, для измерения полной величины ионизации, происходящей за определенный промежуток времени.

ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ СЧЕТЧИКИ

Хотя с помощью ионизационной камеры и можно отмечать отдельные α-частицы, гораздо удобнее заставить возникающие первоначально ионы производить другие ионы в той же области электрического поля; от усилительного контура при этих условиях потребуется меньшая чувствительность.

В пропорциональном счетчике один из электродов представляет собой тонкую проволоку, натянутую по оси полого цилиндра, яв-

ляющегося вторым электродом. Проволока создает вблизи себя сильное электрическое поле даже при сравнительно небольших разностях потенциалов между нею и другим электродом. Это сильное поле быстро ускоряет первичные ионы, образованные α- или β-частицей или фотоном, а эти ускоренные первичные ионы (в частности, электроны) производят в свою очередь вторичные ионы в газе, которым заполнен счетчик, так что импульс тока значительно увеличивается.

Такие счетчики можно сконструировать и применять так, чтобы общее число образовавшихся ионов было пропорционально числу первичных ионов. После усиления импульс тока можно наблюдать при помощи осциллографа; величина импульса будет пропорциональна ионизации, создаваемой первоначальной частицей. При таком способе весьма легко различать α-частицы, β-частицы и фотоны, а усилитель можно так конструировать, чтобы отсчитывать только импульсы, превосходящие заданную величину. Таким образом, пропорциональным счетчиком можно подсчитать α-частицы на фоне β-частиц, и даже можно регистрировать α-частицы, имеющие энергию, бо́льшую определенной величины.

СЧЕТЧИКИ ГЕЙГЕРА-МЮЛЛЕРА

Если в пропорциональном счетчике повышать напряжение, наступает момент, когда первичные ионы, получившиеся от одиночной α-частицы, β-частицы или фотона, не только умножат число первичных ионов в объеме своего образования, но и вызовут разряд во всем счетчике. Происходящее здесь явление напоминает действие спускового крючка огнестрельного оружия. Сила тока через счетчик не зависит от числа первично образовавшихся ионов; более того, ток продолжался бы бесконечно, если бы не были предприняты меры для его погашения. Погашение может быть достигнуто такой электрической схемой, в которой напряжение будет падать, как только пройдет ток; можно также для погашения тока пользоваться смесью газов в счетчике, которые „отравляют“ поверхность электрода, как только происходит разряд, тем самым временно препятствуя дальнейшей эмиссии электронов. Можно комбинировать и оба метода. Счетчик Гейгера-Мюллера был построен раньше, чем пропорциальный счетчик, и остается самым чувствительным прибором для обнаружения

ионизующего излучения, но все его функции сводятся к «подсчету» любого ионизующего излучения, проходящего через счетчик, будь то α-частицы, протоны, электроны или фотоны.

ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СЧЕТЧИКОВ

Одно дело излагать различные принципы ионизационных камер, счетчиков и т. п., другое дело — конструировать их и успешно ими пользоваться. Стенки камеры счетчика должны позволять частицам проникать в счетчик. Для γ-лучей это проблема второстепенная, но для сравнительно медленных электронов, позитронов и α-частиц стенки должны быть весьма тонкими или иметь тонкие окна.

Существует большое разнообразие в деталях самих счетчиков, в промежутке между электродами и размерах электродов, в природе газа, заполняющего камеру, в его давлении и т. д.

Истолкование получаемых с помощью счетчика результатов не просто. Следует учитывать влияние поглощения стенками счетчика и любыми внешними поглотителями, следует учитывать геометрию счетчика по отношению к источнику для того, чтобы иметь возможность из отсчета найти фактическое число ядерных процессов, и, наконец, что иногда весьма важно, должны быть приняты во внимание статистические отклонения, так как все ядерные реакции подчиняются законам теории вероятностей.

КАМЕРА ВИЛЬСОНА

Существует метод наблюдения ядерных частиц, который тоже основан на их ионизующем действии, но не является электрическим. В этом методе использован тот факт, что перенасыщенный пар легче конденсируется на ионах, чем на нейтральных молекулах. Если воздух, насыщенный водяными парами, охлаждать путем расширения сейчас же после прохождения через него α-частицы, на ионах, образованных α-частицей, осаждаются крошечные капельки воды. Они достаточно сильно рассеивают яркий свет, так что можно видеть или фотографировать действительный путь α-частицы.

Этот метод, разработанный К. Т. Вильсоном в Кембридже (Англия) примерно в 1912 году, оказался чрезвычайно плодотворным в изучении поведения отдельных частиц: α-частиц, про-

тонов, электронов, позитронов, мезотронов, фотонов и быстрых атомов, получающихся от столкновений с α-частицами, протонами или нейтронами. В отличие от метода сцинтилляций, применявшегося наряду с данным методом много лет, метод Вильсона не превзойден до сих пор и все еще широко применяется; особенно он полезен для изучения деталей столкновений между ядерными частицами и атомами.

ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД

Пути отдельных частиц, проходящих через вещество, можно также наблюдать в фотографической эмульсии, но длины пробега так малы, что приходится прибегать к микроскопу. На пути движения частиц образуются прямолинейные группы зерен, хорошо различимые в микроскоп. Этот метод наблюдения фактически не требует никакого оборудования, но он утомителен, и применимость его ограничена. Общим потемнением фотографической пленки можно пользоваться для измерения общей интенсивности излучений. Эти пленки применялись как дополнение к электроскопам, или вместо них, в технике безопасности во многих частях Проекта.

НАБЛЮДЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ НЕЙТРОНОВ

Ни один из описанных методов не может быть непосредственно применен к нейтронам. Однако, заряженные частицы, вызываемые нейтронами, дают возможность и в этом случае использовать электрические методы. Заряженные частицы образуются нейтронами в результате упругих соударений с ядром и ядерных реакций. Как уже говорилось, быстрый нейтрон, проходя сквозь вещество, иногда приближается к атомному ядру настолько близко, что сообщает ему большой импульс и энергию. Ядро при этом становится быстрой заряженной частицей, способной вызвать ионизацию в ионизационной камере, счетчике или камере Вильсона. Если скорость мала (тепловые нейтроны), ядро, воспринявшее удар, не будет обладать энергией, достаточной для ионизации. Однако, тепловой нейтрон при своем поглощении может вызвать расщепление ядра с выделением энергии и ионизацией. Таким образом, для обнаружения быстрых нейтронов имеется выбор между упругим столкновением и ядерной реакцией; для обна-

ружения же тепловых нейтронов могут служить лишь вызываемые ими ядерные превращения.

Наиболее употребительной реакцией является $_5B^{10}(n, \alpha)_3Li^7$. Выделяющиеся в ней 2,5 MeV энергии, которые распределяются между α-частицей и ядром $_3Li^7$, достаточны для осуществления ионизации. Превращение ядра бора под действием нейтрона происходит в ионизационной камере или пропорциональном счетчике, наполненных газообразным трехфтористым бором.

Один из наиболее ценных методов измерения плотности нейтронов при помощи ядерных реакций связан с искусственной радиоактивностью. Листочек фольги из материала, который делается радиоактивным под действием бомбардировки нейтронами, помещается в то место, где желательно измерить интенсивность нейтронов. Через определенный промежуток времени листочек удаляется, и его активность измеряется электроскопом или счетчиком. Степень вызванной в нем активности служит мерой количества нейтронов, которые были поглощены. Недостаток этого способа в том, что он не дает мгновенного показания, как ионизационная камера или счетчик.

Одним из самых интересных методов, разработанных при осуществлении Проекта, является использование реакции деления изоурана для обнаружения нейтронов. При помощи разделенных изотопов урана можно регистрировать отдельно быстрые и медленные нейтроны.

Так как вероятность взаимодействий нейтрона с ядром различна для каждой реакции и зависит от скорости нейтрона, перевод отсчетов или измерений тока в числа и скорости нейтронов значительно труднее, чем для других ядерных частиц. Не следует удивляться, если два искусные исследователя дают различные значения для одной и той же ядерной постоянной. Лишь путем тщательного сравнения и истолкования ряда тонких и взаимно связанных экспериментов удается отделить основные факты от случайных погрешностей опытов.

2. ЕДИНИЦЫ МАССЫ, ЗАРЯДА И ЭНЕРГИИ

МАССА

Так как протон и нейтрон являются основными частицами, из которых состоят ядра, казалось бы естественным массу одной из них принять за единицу массы. Выбор, вероятно, пал бы на протон, ядро атома водорода. Существуют веские причины, исторические и другие, почему не был выбран ни протон, ни нейтрон. Вместо этого, за единицу массы в атомной и ядерной физике была принята одна шестнадцатая массы преобладающего изотопа кислорода, O^{16}, которая равна $1{,}6603 \cdot 10^{-24}$ *г*. Масса протона, выраженная через эту единицу, равна 1,00758, а масса нейтрона 1,00893. (Химики обычно применяют слегка отличающуюся от этой единицу массы).

ЗАРЯД

Единицей электрического заряда в науке о ядре принято считать положительный заряд протона. Этот заряд по величине равен заряду электрона, но противоположен ему по знаку, и часто называется зарядом электрона. Заряд электрона равен $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ кулонов. Вспомним, что ток силою в один ампер, протекая в течение одной секунды, переносит заряд в один кулон; значит, заряд электрона равен $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ ампер-секунд.

ЭНЕРГИЯ

За единицу энергии в ядерной физике принят электрон-вольт (eV), который определяется как кинетическая энергия, которую частица с зарядом электрона приобретает при свободном движении в поле с падением потенциала в один вольт. Часто удобнее применять в миллион раз большую единицу — мегаэлектрон-вольт (MeV).

Соотношения между электрон-вольтом и другими общепринятыми единицами энергии даны в следующей таблице:

ТАБЛИЦА ПЕРЕВОДА ЕДИНИЦ ЭНЕРГИИ

Надо умножить	на	чтобы получить
MeV	$1,07 \cdot 10^{-3}$	ед. массы
	$1,60 \cdot 10^{-6}$	эрги
	$3,83 \cdot 10^{-14}$	калории
	$4,45 \cdot 10^{-20}$	квт-часы
ед. массы	$9,31 \cdot 10^{2}$	MeV
	$1,49 \cdot 10^{-3}$	эрги
	$3,56 \cdot 10^{-11}$	калории
	$4,15 \cdot 10^{-17}$	квт-часы
эрги	$6,71 \cdot 10^{2}$	ед. массы
	$6,24 \cdot 10^{5}$	MeV
	$2,39 \cdot 10^{-8}$	калории
	$2,78 \cdot 10^{-14}$	квт-часы
калории	$2,81 \cdot 10^{10}$	ед. массы
	$2,62 \cdot 10^{13}$	MeV
	$4,18 \cdot 10^{7}$	эрги
	$1,16 \cdot 10^{-6}$	квт-часы
квт-часы	$2,41 \cdot 10^{16}$	ед. массы
	$2,25 \cdot 10^{19}$	MeV
	$3,60 \cdot 10^{13}$	эрги
	$8,60 \cdot 10^{5}$	калории

3. ЗАПАЗДЫВАЮЩИЕ НЕЙТРОНЫ ПРИ ДЕЛЕНИИ УРАНА

Как отмечалось в главе VI, управление котлом значительно облегчается благодаря тому, что часть нейтронов, освобождаемых при делении урана, испускается только по прошествии более одной секунды с момента деления. Важно было изучить это явление экспериментально. Такие эксперименты были описаны Снеллом, Недзелем и Ибсером в докладе от 15 мая 1942 г., из которого мы приводим следующую выдержку:

«Данный эксперимент состоит из двух взаимно связанных частей — одной, относящейся к кривой распада, и другой — к интенсивности запаздывающих нейтронов, выраженной через интенсивность «мгновенных» нейтронов деления.

КРИВАЯ РАСПАДА ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ

Источником нейтронов служила бериллиевая мишень циклотрона Чикагского университета, обстреливаемая пучком дейтронов в 20 μA с энергией в 8 MeV. Вблизи мишени помещался тонкостенный железный сосуд, содержавший 160 фунтов U_8O_8. Этот сосуд окружался слоем парафина толщиною в 2″. По оси сосуда помещался пропорциональный счетчик с BF_8, окруженный тонким слоем парафина. Счетчик соединялся через усилитель со счетным устройством («деление 64»), снабженным интерполирующими лампами и регистратором импульсов Сенко (Central Scientific Co.); отметчик времени в одну десятую секунды, приводимый в движение синхронным мотором, и секундомер со шкалой, разделенной на сотые секунды, монтировались на панели счетного устройства около интерполирующих ламп и регистратора импульсов. Эта группа шкал и ламп фотографировалась ручной камерой «Септ» на ленте, скорость движения которой могла изменяться. Запись на кинопленке времен и показаний счетчика давала возможность построить кривые распада.

Эксперимент производился следующим образом: во время бомбардировки пускался в ход секундомер (отметчик времени работал непрерывно), счетчик и усилитель были включены, но выходящие из усилителя импульсы тока шунтировались. Шкала была установлена на нуль. После предупредительного сигнала один из работников выключал циклотрон, а другой переключал выходной ток усилителя на измерительный контур и начинал фотографировать.

Легко было снять первую фотографию за полсекунды до выключения циклотрона. Обычно производилось от шестидесяти до ста фотоснимков. Необходимость одновременного применения секундомера и отметчика времени была вызвана тем, что точность секундомера в $^1/_{10}$ секунды была необходима для малых промежутков времени между фотоснимками в течение начальной части цикла, но секундомер останавливался раньше, чем заканчивались отсчеты. Для следующих промежутков времени достаточную точность обеспечивал отметчик времени.

Было произведено около сорока серий опытов при меняющихся условиях эксперимента. Для лучшего разрешения коротких периодов давались активации в одну или две секунды. Производилась продолжительная, интенсивная бомбардировка длительностью 15—20 минут, насколько возможно близко к мишени, чтобы выявить с максимальной интенсивностью длительные периоды активности. Несколько 5-минутных бомбардировок, во время которых циклотрон давал по возможности устойчивый пучок, производилось для изучения относительных интенсивностей насыщения различных активностей; во время этих активаций пучок циклотрона ослаблялся до 1 или 2 μA, чтобы воспрепятствовать чрезмерному возрастанию начальной скорости отсчетов (число отсчетов 300 в секунду было принято в качестве верхней границы, допустимой для счетчика). В наличии имелось два счетчика с BF_3: один из них имел поперечное сечение для тепловых нейтронов в 2,66 *см*², а другой 0,43 *см*². После сильной активации, можно было еще в течение 13 мин. наблюдать запаздывающие нейтроны. Были произведены определения фона (повидимому, обусловленного нейтронами самопроизвольного деления урана). Показания фона доходили примерно до 0,4 отсчета в секунду для большого счетчика и вычитались из измеряемого эффекта.

Изучение всех кривых распада дает следующую общую картину:

Период полураспада	Относительная начальная интенсивность, активированная до насыщения
57 ± 3 сек.	0,135
24 ± 2 „	1,0
7 „	1,2
2,5 „	1,2

Активности с периодом более 57 сек. не удалось наблюдать, даже после самой интенсивной бомбардировки, которую мы смогли осуществить в течение 20 минут.

Эти результаты приводят к следующему уравнению кривой распада для запаздывающих нейтронов после активации до насыщения:

$$\text{Активность} = \text{константа}\,(1{,}2e^{-0{,}28t} + 1{,}2e^{-0{,}099t} + 1{,}0e^{-0{,}029t} + 0{,}135e^{-0{,}012t}),$$

где t выражено в секундах».

Вторая часть экспериментов относилась к измерению общего числа нейтронов, испускаемых в промежуток времени от 0,01 сек. до 2,0 минут после выключения циклотрона. Предполагая, что все наблюдавшиеся запаздывающие нейтроны входят в указанные выше четыре группы, необходимо считать, что 1,0 — 0,2 процента нейтронов, выбрасываемых при делении урана, запаздывают по крайней мере на 0,01 сек. и что примерно для 0,07 процента запаздывание достигает одной минуты. Если запроектировать эффективное значение k — коэффициента размножения для типового котла при отсутствии регулирующих стержней — всего лишь в 1,01, и если предел полного изменения k под влиянием одного регулирующего стержня определить в 0,002, то число запаздывающих нейтронов достаточно для обеспечения легкого управления.

4. ПЕРВЫЙ КОТЕЛ С САМОРАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИЕЙ

В главе VI были кратко описаны устройство и работа первого котла с саморазвивающейся цепной реакцией. Хотя от изложения деталей приходится пока из соображений секретности воздержаться, приведенные ниже параграфы дают несколько более полное описание, основанное на докладе Ферми. Котел был построен Ферми и его сотрудниками осенью 1942 г.

ОПИСАНИЕ КОТЛА

Согласно первоначальному плану, котел должен был иметь приблизительно сферическую форму, причем наиболее чистые уран и графит нужно было размещать вблизи центра. Контрольные измерения показали, однако, что критические размеры были достигнуты раньше, чем была завершена запроектированная сфера, и, в соответствии с этим, конструкция была видоизменена. В окончательном виде котел представлял сплющенный сфероид, плоский в верхней части. Было необходимо расположить блоки урана или окиси урана на одинаковых друг от друга расстояниях в кубической решетке, внутри графита. Графит нарезался в виде кирпичей и складывался слоями, попеременно содержавшими и не содержавшими урановые блоки. Эти блоки располагались по углам квадратных плит графита. Критические размеры были достигнуты, когда котел был уложен до высоты лишь в три четверти той, которая казалась необходимой по самым осторожным расчетам. После этого был добавлен всего лишь один слой.

Применявшийся графит был преимущественно от фирм National Carbon Co. и Speer Graphite Co. Котел содержал 12 400 фунтов урана, который поставлялся фирмами Вестингауз, Metal Hydrides Co. и Эймс. Так как в решетке было значительно больше точек, чем имелось блоков металла, то свободные места были заполнены блоками прессованной окиси урана.

Для управления и выполнения экспериментов имелось десять каналов, пронизывающих весь котел. Три из них вблизи центра применялись для регулирующих и аварийных стержней. Для облегчения экспериментирования, в частности, для удаления образцов, один ряд графитовых кирпичей, несущих уран и проходящих вблизи центра, был уложен так, что его можно было целиком выдвигать из котла.

Графитовая сфера поддерживалась деревянным каркасом, установленным на настиле на утрамбованной площадке ниже Вест-Стэндса (Стэг Филд).

ОЖИДАЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОТЛА

Металлическая решетка в центре котла и две другие главные решетки, образующие основную конструкцию остальной части котла, были каждая в отдельности изучены в экспоненциальных экспериментах №№ 18, 27 и 29. Эти эксперименты дали для коэффициента размножения значение 1,07 для металлической решетки и 1,04 и 1,03 — для решеток из окиси, причем различие двух последних величин было обусловлено различием сортов применявшегося графита. Необходимо помнить, что это — значения коэффициентов размножения для решеток неограниченных размеров. Предсказание действительного эффективного значения коэффициента размножения, $k_{эфф.}$ для строящегося котла зависело от достоверности значения k, полученного из экспоненциальных экспериментов, от правильного усреднения для различных решеток и от правильности расчета $k_{эфф.}$ из среднего значения k для системы бесконечных размеров. Хотя начальные проектные данные котла были умышленно превышены, его успешное действие, когда он был лишь частично закончен, показывало, что значения коэффициентов размножения, вычисленные из экспоненциальных экспериментов, оказались слишком малыми. Наблюдавшееся эффективное значение коэффициента размножения для фактически построенной части запроектированной установки было около 1,0006, когда все поглотители нейтронов были удалены.

ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ СБОРКЕ КОТЛА

Для того, чтобы быть уверенными, что при сборке котла случайно не будут превзойдены критические размеры, непрерывно

производились измерения нейтронной активности. Эти измерения служили также для изучения свойств размножения нейтронов и давали возможность предсказать, где будет достигнута критическая точка.

Для измерения интенсивности реакции можно применять любой детектор нейтронов или γ-лучей. Нейтронные детекторы лучше, так как они быстрее реагируют и не подвержены влиянию излучений продуктов деления после прекращения экспериментов. Нейтронные детекторы (счетчик с трехфтористым бором) и ионизационные камеры для измерения γ-лучей были расположены внутри и вокруг котла. Некоторые из ионизационных камер применялись для приведения в действие регистрирующих приборов и автоматических аварийных приспособлений.

В самом котле измерения производились с помощью детекторов двух типов. Счетчик с трехфтористым бором вставлялся в щель на расстоянии в 43″ от основания; с этим счетчиком производились частые отсчеты. Кроме того, фольга из индия каждый вечер облучалась в положении, по возможности самом близком к эффективному центру котла, а индуцированная активность фольги измерялась на следующее утро и сравнивалась с отсчетами счетчика с BF_3.

Результаты подобных измерений могут быть выражены двояким образом. Так как число вторичных нейтронов, образовавшихся в процессе деления, постоянно возрастает по мере того, как котел строится, то активность A, индуцированная в стандартной фольге индия в центре, будет постоянно возрастать с увеличением числа слоев котла. Как только эффективное значение коэффициента размножения превысит единицу, A будет возрастать теоретически до бесконечности. Это приближение к бесконечности трудно наблюдать, и поэтому применяется другой способ выражения результатов. Предположим, что промежутки решетки и чистота материалов графито-урановой конструкции таковы, что коэффициент размножения сферы бесконечных размеров был бы в точности равен единице. Тогда, для реальной сферы подобной же конструкции, но конечного радиуса, активация детектора, помещенного в центре, была бы пропорциональна квадрату радиуса. Оказалось возможным определить соответствующий эффективный радиус $R_{\text{эфф}}$. для реального котла в каждой из стадий его сборки. От-

сюда вытекало, что если бы коэффициент k_∞ был точно равен единице в среднем для решетки в котле, то активность A детектора в центре возрастала бы с возрастанием $R_{эфф.}$ таким образом, что $R^2_{эфф.}/A$ оставалось бы постоянным. Если бы k_∞ для решетки было больше единицы, то при приближении

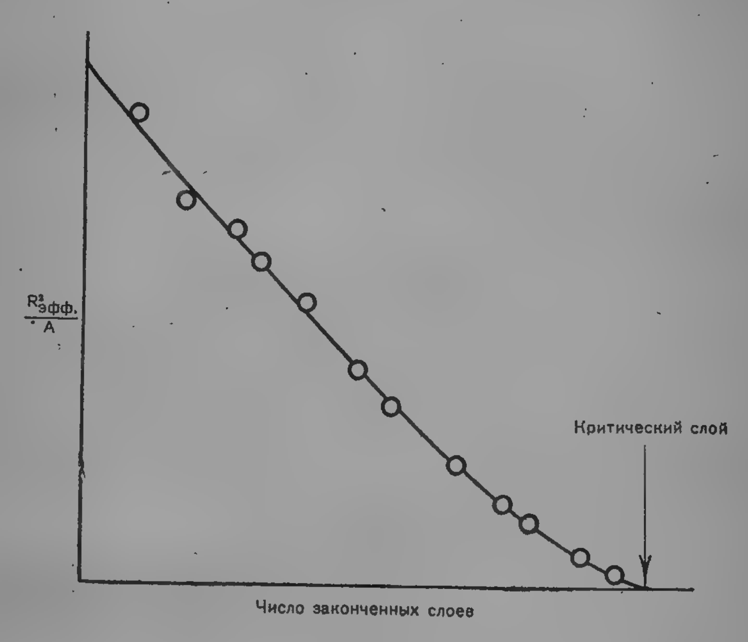


Рис. 7.

размеров котла к критическому значению, т. е. при приближении значения $k_{эфф.}$ к единице, A должно было бы стремиться к бесконечности и, следовательно $R^2_{эфф.}/A$—стремиться к нулю. Экстраполируя кривую зависимости $R^2_{эфф.}/A$ от размера котла, т. е. от числа слоев до точки ее пересечения с осью абсцисс, можно предсказать, в каком слое $k_{эфф.}$ станет равным единице. Такая кривая, изображенная на рис. 7, показывает, в каком слое достигаются критические размеры. Менее удобный, но более прямой способ записи результатов изображен на рис. 8, который показывает рост активности нейтронов котла с увеличением числа слоев.

При сборке котла, значительно ранее достижения критического слоя, в соответствующие щели были вставлены кадмиевые поло-

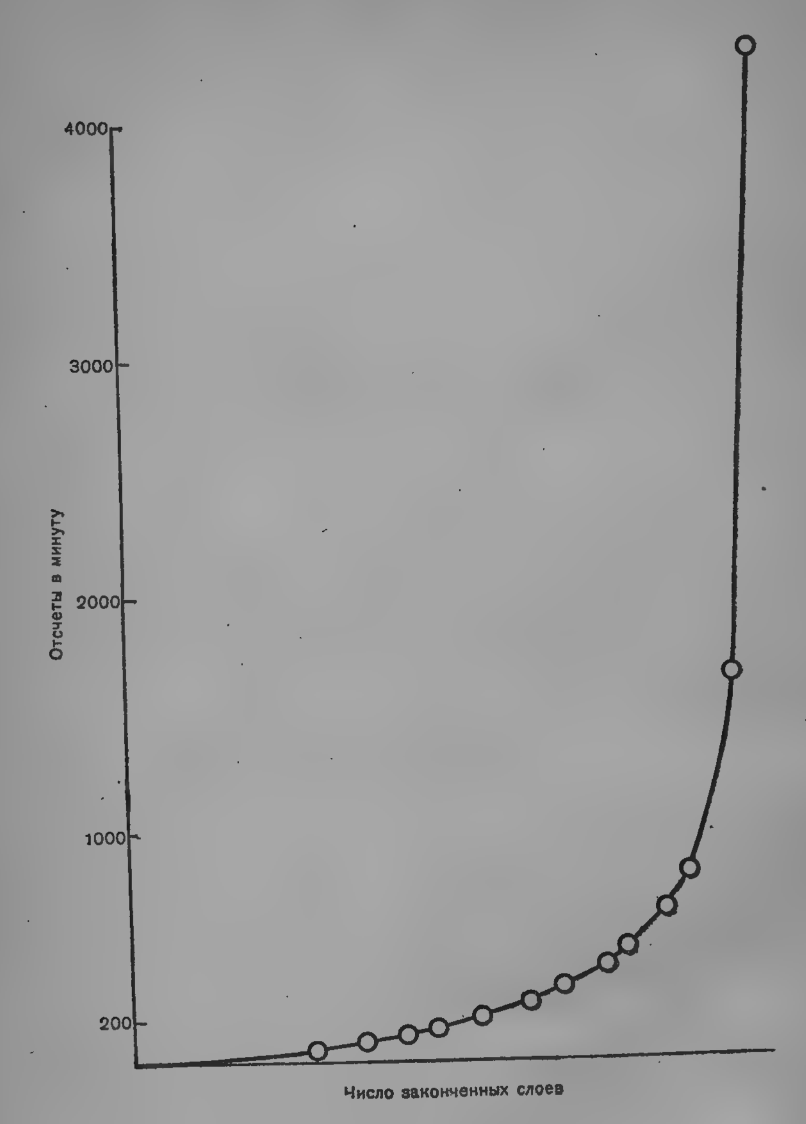

4000
3000
2000
1000
200
Отсчеты в минуту
Число законченных слоев

Рис. 8.

сы. Они вынимались по одному разу в день, с надлежащими предосторожностями, чтобы не пропустить момента приближения к критическим условиям. Так производилась постройка котла, пока не был уложен критический слой.

УПРАВЛЕНИЕ

Управление реакцией достигалось вдвиганием в котел нескольких полосок из материала, поглощающего нейтроны, — кадмия или бористой стали. Пока котел бездействовал, несколько таких полосок кадмия вставлялись в ряд щелей, что уменьшало эффективный коэффициент размножения до величины намного ниже единицы. Для доведения котла до условий ниже критических достаточно было лишь одной из кадмиевых полос. Кроме этих полос, которые могли применяться для ручного управления котлом, были предусмотрены еще два аварийных стержня и один стержень для автоматического управления. Стержень автоматического управления приводился в действие двумя электромоторами, реагирующими на воздействие ионизационной камеры и усилительной системы, так что при возрастании интенсивности реакции сверх желаемого уровня стержень вдвигался, и наоборот.

РАБОТА КОТЛА

Для пуска котла все кадмиевые полосы, кроме одной, удалялись. Оставшаяся полоса медленно выдвигалась наружу. По мере приближения к критическим условиям, интенсивность нейтронов внутри котла быстро возрастала. Следует, однако, заметить, что когда последняя полоса кадмия была внутри котла в положении, отвечающем эффективному значению коэффициента размножения, лишь немного меньшему единицы, требовалось много времени для того, чтобы интенсивность достигла насыщения. Аналогично, когда кадмиевая полоса была выдвинута наружу настолько, чтобы $k_{эфф.}$ стало больше единицы, интенсивность возрастала довольно медленно. Так, если стержень был выдвинут на 1 *см* от критического положения, «время релаксации», т. е. время, необходимое для того, чтобы интенсивность удвоилась, составляло около четырех часов. Эти длинные «периоды релаксации» являются результатом наличия запаздывающих нейтронов (Приложение 3),

что делает сравнительно легкой эксплоатацию котла при постоянном уровне интенсивности.

Котел впервые был пущен 2 декабря 1942 г., с максимальной мощностью в ½ W. 12 декабря интенсивность была доведена примерно до 200 W; повышать далее интенсивность считалось небезопасным для персонала внутри и снаружи здания. Во время работы при высокой интенсивности производились измерения излучения около котла, внутри здания и снаружи.

5. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ДОКЛАДОВ

Ниже приведен перечень характерных докладов о работах, выполненных в Металлургической лаборатории Чикагского университета в 1942 г.

Таблица для вычисления процента потерь, обусловленных присутствием примесей в сплаве.

О радие-бериллиевом источнике нейтронов.

Предварительные оценки излучений от продуктов деления.

Фон естественных нейтронов в котле.

Поперечное сечение поглощения быстрых нейтронов радон-бериллиевого источника.

О механических напряжениях, вызванных температурными градиентами в стержнях и сферах.

Влияние геометрии на резонансное поглощение нейтронов ураном.

Защита от излучений.

Планирование опытов по жидкостному охлаждению.

Отчет о возможности очистки урана путем образования и разложения карбонила.

О радиоактивности гелиевого охлаждения.

Оценка устойчивости эфира при различных условиях облучения.

Отравление ураном.

Активности трансурановых элементов и продуктов деления.

Химическое действие радиоактивного излучения на воздух, окружающий котел.

Оценка химического действия радиоактивного излучения на охлаждающую воду в котле.

Очистка уранил-нитрата методом извлечения.

Диффузия продуктов деления из литого урана при 600° С и 1000° С.

6. СООБЩЕНИЕ ВОЕННОГО МИНИСТЕРСТВА ОБ ИСПЫТАНИИ АТОМНОЙ БОМБЫ В НЬЮ МЕКСИКО 16 ИЮЛЯ 1945 г.

Успешный переход человечества к новому веку — атомному веку — совершился 16 июля 1945 г. на глазах у затаившей дыхание группы знаменитых ученых и военных представителей, собравшихся в пустынной местности Нью-Мексико, чтобы в первый раз увидеть воочию окончательные результаты их усилий, обошедшихся в 2 000 000 000 долларов. Здесь, на отдаленном участке авиабазы Аламогордо, в 120 милях к юго-востоку от Альбукерка, в 5 ч. 30 м. утра был вызван первый созданный человеком атомный взрыв — выдающееся достижение физики ядра. Темные тучи, ливень и молния усиливали драматический эффект.

Установленное на стальной башне новое оружие, предназначенное для изменения характера войны или могущее даже стать средством прекращения всех войн, было приведено в действие движением руки, возвестившим вступление человека в мир новой физики. Успех превзошел самые дерзкие ожидания. Ученые заставили небольшое количество вещества, полученное в результате работы огромных, специально сконструированных промышленных установок, освободить энергию, запертую внутри атома с начала времен. Результат был баснословен. Теория, едва намечавшаяся в довоенных лабораториях, была претворена в практику.

Эта фаза Проекта атомной бомбы, возглавляемого генерал-майором Лесли Р. Гроувзом, осуществлялась под руководством д-ра И. Р. Оппенгеймера, физика-теоретика из Калифорнийского университета. Ему следует поставить в заслугу превращение атомной энергии в орудие войны.

Напряжение перед взрывом достигло огромных пределов. Всегда существовала возможность провала. Слишком большой успех, по мнению некоторых присутствующих, значил бы, что оружие не поддается контролю и не может быть использовано.

Окончательная сборка атомной бомбы началась в ночь на 12 июля на одной старой ферме. По мере того, как различные составные части бомбы прибывали из отдаленных пунктов, нервное напряжение ученых все возрастало. Самым хладнокровным из всех был ученый, который производил монтаж важнейшей части бомбы — сердечника — профессор Корнельского университета д-р Р. Ф. Бэчер.

Стоимость проекта, включающего возведение целых городов и невиданных доселе заводов, растянувшихся на многие мили, небывалая по объему экспериментальная работа — все это, как в фокусе, сконцентрировано в опытной бомбе. Никакая другая страна в мире не была бы способна на подобную затрату мозговой энергии и технических усилий.

Понимание значения этих завершающих мгновений перед окончательным конкретным испытанием не было утеряно этими людьми науки. Они полностью сознавали свое положение пионеров иного века. Они знали также, что одно неверное движение унесет их и весь их труд в вечность. Перед началом сборки бригадный генерал Томас Ф. Фаррелл, представитель генерала Гроувза, подписал важную расписку. Это знаменовало формальный переход невозместимого материала из рук ученых в руки армии.

Во время окончательной экспериментальной сборки пришлось пережить несколько неприятных минут, когда произошла задержка с одной важной деталью бомбы. Весь аггрегат был обработан механически с величайшей точностью. Деталь была уже частично вставлена, когда вдруг плотно застряла и не вдвигалась дальше. Однако, д-р Бэчер не потерял присутствия духа и заверил группу в том, что для устранения задержки нужно только время. Через три минуты слова д-ра Бэчера оправдались, и сборка закончилась без дальнейших инцидентов.

Бригады специалистов, состоявшие из виднейших ученых различных отраслей науки, приняли на себя специальные части сборки. Члены каждой бригады отдали разработке бомбы месяцы и даже годы совместного целеустремленного труда.

В субботу 14 июля механизм, который должен был определить успех или провал всего проекта, был поднят на верхушку стальной башни. Два дня продолжалась подготовительная работа. Помимо аппарата для получения детонации, башня была оснащена

полным комплектом приборов для определения биения пульса и всех реакций бомбы.

Неблагоприятная погода, упорно державшаяся во время сборки, очень беспокоила собравшихся экспертов, работа которых шла под вспышки молнии и раскаты грома. Погода, необычная и угнетающая, исключала наблюдение испытания с воздуха. Она даже задержала на полтора часа взрыв, намеченный на 4 часа утра. Еще за много месяцев был установлен приблизительно день и час испытания. Это был один из величайших секретов наилучше сохраненной тайны всей войны.

Ближайший пункт наблюдения помещался в 10 000 ярдах к югу от башни, где в убежище из строевого леса и земли были расположены приборы управления. В 17 000 ярдах от башни — в том пункте, где наблюдать было лучше всего, заняли свои посты руководящие лица проекта атомной бомбы. В их число входили: генерал Гроувз, д-р Ванневар Буш, глава Управления научно-исследовательских работ, и д-р Джемс Б. Конант, президент Гарвардского университета.

Собственно детонация была поручена д-ру К. Т. Бейнбриджу из Массачузетского технологического института. Он и лейтенант Буш, командовавший отрядом военной полиции, должны были последними произвести осмотр башни с космической бомбой.

В три часа утра участники испытания отправились на контрольную станцию. Генерал Гроувз и д-р Оппенгеймер посоветовались с синоптиками. Было принято решение приступить к испытанию, несмотря на отсутствие уверенности в том, что погода будет благоприятной. Взрыв был назначен на 5 ч. 30 м. утра.

Генерал Гроувз вместе с д-ром Конантом и д-ром Бушем непосредственно перед моментом испытания присоединились к ученым, собравшимся в лагере базы. Всем присутствующим было приказано лечь на землю, лицом вниз, головой в сторону, противоположную башне.

Когда приблизился критический момент, напряжение в контрольном помещении достигло колоссальных размеров. Наблюдательные пункты на территории были связаны с контрольным помещением посредством радио, и за двадцать минут до начала испытания д-р С. К. Алисон из Чикагского университета стал у микрофона и начал периодически объявлять время.

Сигналы времени: «осталось 20 минут, осталось пятнадцать минут» и т. д. и т. д., увеличивали напряжение до наивысшего предела: все находившиеся в контрольном помещении, включая д-ра Оппенгеймера и генерала Фаррелла, затаили дыхание и молились со всей напряженностью момента, который навсегда сохранится в их памяти. При сигнале «осталось 45 секунд» было включено автоматическое устройство, и с этого времени все части сложнейшего механизма действовали без контроля человека, и только у запасного выключателя был поставлен научный работник, готовый сделать попытку остановить взрыв, если будет дан приказ. Приказ отдан не был.

В назначенный момент ослепительная вспышка осветила все пространство ярче, чем самый яркий дневной свет. Отчетливым рельефом выделился горный хребет, находившийся в трех милях от места наблюдения. Затем раздался страшный раскатистый грохот, и прошла мощная воздушная волна, свалившая с ног двух человек, находившихся около контрольного помещения. Непосредственно после этого огромное, многоцветное клубящееся облако взлетело на высоту более 40 000 футов. Облачность на его пути исчезла. Вскоре субстратосферные ветры рассеяли ставшую теперь серой массу.

Испытание закончилось, проект удался.

Стальная башня полностью испарилась. Там, где стояла башня, был огромный кратер с пологими краями. Ошеломленные, но вздохнувшие облегченно при виде успеха испытания, ученые сразу же приступили к оценке мощи нового оружия Америки. Для исследования кратера к месту взрыва направились специально оборудованные танки, на одном из которых был известный исследователь ядра д-р Энрико Ферми. Ответ на их изыскания дают теперешние разрушения в Японии, вызванные первым военным применением атомной бомбы.

Ясно, что если бы не пустынность местности, где проводилось испытание, и не договоренность с прессой в данном районе, испытание привлекло бы внимание широкой общественности. Но даже и при этих условиях многие жители этой местности и до сих пор обсуждают эффект взрыва. Интересным фактом, сообщенным прессой, было впечатление одной слепой девушки близ Альбукерка, на расстоянии многих миль от места действия, которая

в тот момент, когда вспышка озарила небо и еще не было слышно взрыва, воскликнула: «Что это?».

Генерал Гроувз и генерал Фаррелл дали следующие интервью. Генерал Гроувз рассказал: «Вот мои впечатления о великих событиях ночи: Я проснулся в 01.00 и примерно до пяти непрерывно был с д-ром Оппенгеймером. Конечно, он чувствовал себя напряженно, хотя его ум работал со свойственной ему необычайной ясностью. Я пытался скрыть от него явную озабоченность его помощников неопределенностью метеорологических условий. К 03.30 мы решили, что нам может быть удастся произвести взрыв в 5.30. К 04.00 дождь прекратился, но все небо было покрыто густыми тучами. С течением времени наше решение становилось все тверже.

В продолжении большей части этого времени мы вдвоем несколько раз выходили из контрольного помещения, чтобы посмотреть на звезды и уверить друг друга в том, что одна или две видимые звезды стали ярче. В 05.10 я покинул д-ра Оппенгеймера и возвратился на главный наблюдательный пункт, в 17 000 ярдах от места взрыва. Согласно нашим приказаниям, весь свободный персонал собрался на небольшой возвышенности.

За две минуты до установленного по расписанию момента взрыва все легли лицом вниз, ногами к месту взрыва. Когда громкоговоритель на контрольной станции провозгласил остающееся время, воцарилась благоговейная тишина. Д-р Конант сказал, что он никогда не воображал, что секунды могут быть такими долгими. В соответствии с приказом, большинство присутствующих защитили глаза тем или иным способом.

Сначала вспыхнул свет ни с чем не сравнимой яркости. Мы все перевернулись и сквозь темные очки увидели огненный шар. Приблизительно через сорок секунд пришла взрывная волна, за которой последовал звук, но ни то, ни другое не показалось нам поразительным — так потрясла нас необычайная интенсивность света.

Образовалось большое плотное облако, которое, клубясь, вздымалось вверх с огромной силой и примерно в пять минут достигло субстратосферы.

Вскоре после главного взрыва в облаке произошли два допол-

нительные взрыва меньшей силы, не сопровождавшиеся световыми эффектами.

Облако поднялось на большую высоту сначала в виде шара, затем оно приняло форму гриба, затем превратилось в длинный, похожий на трубу столб и, наконец, было развеяно в нескольких направлениях переменными ветрами на различных высотах.

Д-р Конант дотянулся до меня, и мы пожали друг другу руки, взаимно поздравляя один другого. Д-р Буш, который был с другой стороны от меня, сделал то же самое. Все присутствующие, даже не посвященные, испытывали чувство глубокого благоговения. Конант, Буш и я были охвачены тем же чувством, но в еще бо̀льшей мере, от сознания, что оправдалась вера тех, кто нес ответственность за возникновение и осуществление этого исполинского проекта».

Вот впечатления генерала Фаррелла: «Драматическая сцена внутри убежища не поддается описанию. Внутри и вокруг убежища собралось до двадцати человек, принимавших участие в окончательных приготовлениях. В их число входили: д-р Оппенгеймер, директор, вынесший на себе великое научное бремя руководства разработкой оружия, с десятком его главных помощников, д-р Кистяковский, д-р Бейнбридж, наблюдавший за всеми деталями подготовки к испытанию, метеоролог и некоторые другие. Здесь же находилась группа солдат, два или три армейские офицера и один морской офицер. Убежище было заполнено самыми разнообразными инструментами и радиоаппаратурой.

В течение двух полных лихорадочного возбуждения часов, предшествовавших взрыву, генерал Гроувз оставался с директором. За двадцать минут до назначенного часа генерал Гроувз отправился на свою станцию в лагере базы, во-первых, потому, что она являлась лучшим пунктом для наблюдения и, во-вторых, в связи с нашим правилом, согласно которому он и я не должны быть вместе в таких положениях, где имелся элемент опасности, который в данном случае существовал в обоих пунктах.

Тотчас после ухода генерала Гроувза по радио стали объявлять, сколько времени осталось до взрыва; это делалось для другой группы наблюдающих испытание и участвующих в нем. Напряжение быстро возрастало по мере приближения назначенного момента и перехода от минут к секундам. Каждый в этом поме-

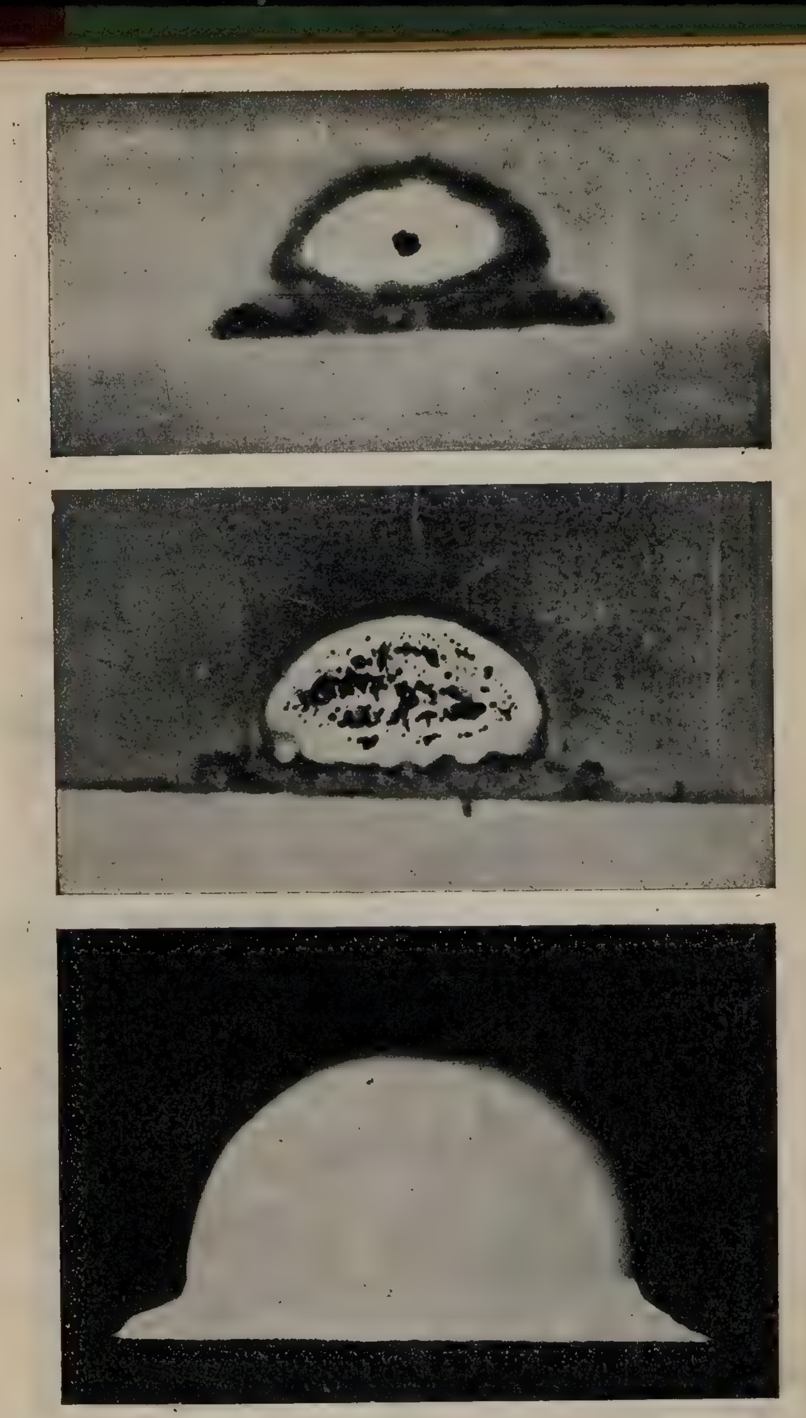
щении знал об ужасных скрытых возможностях, которые, как они думали, не были исключены. Ученые чувствовали, что их вычисления должны быть правильны и что бомба должна взорваться, но в душе у каждого была немалая доля сомнения.

Мы стремились к неизвестному и не знали, что может из этого выйти. Можно сказать наверняка, что большинство присутствующих молилось и молилось более горячо, чем когда бы то ни было раньше. Если взрыв удастся, это будет оправданием нескольких лет интенсивного труда десятков тысяч людей — государственных деятелей, ученых, инженеров, промышленников, солдат и многих других.

В то краткое мгновение в далекой пустыне Нью-Мексико колоссальные усилия мозговой и мускульной энергии всех этих людей привели внезапно к ошеломляющему результату. По мере того, как часы отсчитывали последние секунды, напряжение д-ра Оппенгеймера, на которого было возложено весьма тяжелое бремя, все возрастало. Он почти не дышал. Он держался за столб, чтобы сохранить равновесие. Последние несколько секунд он пристально смотрел прямо перед собой и затем, когда человек, объявлявший время, закричал «Время!», и все осветилось колоссальной вспышкой света, за которой вскоре раздался низкий, раскатистый рев взрыва, напряжение на его лице сменилось выражением огромного облегчения. Некоторые из наблюдателей, стоявшие сзади убежища, были сбиты с ног воздушной волной.

Напряжение в комнате разрядилось, и все начали поздравлять друг друга. Каждый чувствовал: «Вот оно!» Что бы теперь ни случилось, все знали, что беспримерная научная работа была сделана. Деление атомов не будет более скрыто в уединении мечтаний физиков-теоретиков. Оно оказалось почти взрослым уже при рождении. Это была великая новая сила для использования во благо или во зло. В убежище царило чувство, что все, имевшие отношение к рождению этой новой силы, посвятят свою жизнь тому, чтобы она всегда использовалась во благо и никогда — во зло.

Д-р Кистяковский с радостным криком заключил д-ра Оппенгеймера в объятия и расцеловал его. Другие были также полны энтузиазма. В эти несколько минут все сдерживаемое волнение вырвалось наружу, и все тотчас же поняли, что взрыв далеко



Первое испытание атомной бомбы в Нью-Мексико 16 июля 1945 года (снимки с расстояния 6 миль). *Наверху*: Начало взрыва. Это небольшое облако разрослось затем в высоту до 40 000 футов. *В центре*: Многоцветное облако, образовавшееся в результате взрыва. Тёмные пятна, по сообщениям наблюдателей, были ярче солнца. *Внизу:* Более поздняя стадия развития облака.



Фотография, снятая в момент взрыва бомбы с расстояния 6 миль. (Диск в нижнем правом углу является следствием случайного отражения от линзы фотокамеры).

превзошел оптимистические ожидания и самые смелые надежды ученых. Все чувствовали, что они присутствуют при рождении нового века — века атомной энергии — и сознавали свою глубокую ответственность за то, чтобы помочь направить по должному пути огромные силы, ключ к которым был найден впервые в истории.

Относительно настоящей войны у всех было такое чувство, что независимо от того, что еще может случиться, у нас есть средство обеспечить ее быстрое окончание и спасти жизнь тысячам американцев. Что же касается будущего, то было вызвано к жизни нечто большое и нечто новое, что пожалуй окажется неизмеримо важнее открытия электричества или любого другого из великих открытий, оказавших сильное влияние на наше существование.

Эффект действия этих сил вполне можно назвать беспрецедентным, великолепным, прекрасным, огромным и ужасающим. Никогда раньше не существовало вызванного человеком явления такой колоссальной мощи. Световой эффект вспышки не поддается описанию. Вся местность была освещена палящим светом, сила которого во много раз превосходила силу полуденного солнца. Этот свет был золотым, пурпурным, фиолетовым, серым и синим. Он осветил каждую вершину, ущелье и гребень близлежащего горного хребта с такой ясностью и красотой, которых нельзя описать, а надо видеть, чтобы представить их себе. Это было то великое и прекрасное, о чем великие поэты только мечтали, но что они описывали бедными и неадекватными образами. Спустя тридцать секунд произошел взрыв, воздушная волна с силой ударила по людям и предметам, почти непосредственно за этим последовал сильный раскатистый, наводящий ужас рев, напоминавший о Судном дне и заставивший нас почувствовать, что мы, слабые существа, совершили святотатство тем, что осмелились узурпировать управление силами, которые до сего времени были во власти только Всемогущего. Слова — недостаточное орудие для ознакомления тех, кто не присутствовал на испытании, с его физическим, духовным и психологическим эффектом. Чтобы постигнуть это, надо было видеть все своими собственными глазами».

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

(Цифры указывают номера параграфов, II-1 и т. д.—номера приложений)

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

(Цифры указывают номера параграфов, П-1 и т. д.—номера приложений)



